

**DESARROLLO DE UN SISTEMA INYECCION DE PLASTICOS DE DOS  
ETAPAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE POLIETILENO RECICLADO**

**RODRIGO ARNUL QUIÑONES JAIME  
HECTOR DAVID GONZALEZ CASTRO**

**CORPORACION UNIVERSITARIA COMFACAUCA UNICOMFACAUCA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
INGENIERIA MECATRONICA  
POPAYAN, CAUCA  
2023**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA INYECCION DE PLASTICOS DE DOS  
ETAPAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE POLIETILENO RECICLADO**

**RODRIGO ARNUL QUIÑONES JAIME  
HECTOR DAVID GONZALEZ CASTRO**

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO PARA OTORGAR POR EL TITULO DE  
INGENIERO MECATRÓNICO**

**Director del proyecto**

**PhD. Javier Andrés Muñoz Chaves**

**Codirector**

**PhD. Diego Andrés Campo Ceballos**

**CORPORACION UNIVERSITARIA COMFACAUCA UNICOMFACAUCA.**

**FACULTAD DE INGENIERIAS**

**INGENIERIA MECATRONICA**

**POPAYAN, CAUCA**

**2023**

Nota de Aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

---

---

Jurado

---

---

---

---



## CONTENIDO

CONTENIDO .....	5
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABLAS .....	12
AGRADECIMIENTOS.....	13
RESUMEN .....	15
ABSTRACT .....	17
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	19
2. JUSTIFICACIÓN .....	22
3. OBJETIVOS.....	25
3.1. <b>Objetivo general</b> .....	<b>25</b>
3.2. <b>Objetivos específicos</b> .....	<b>25</b>
4. MARCO DE REFERENCIA .....	26
4.1. <b>Marco teórico</b> .....	<b>26</b>
4.2. <b>Contaminación</b> .....	<b>26</b>
4.3. <b>Economía circular</b> .....	<b>26</b>
4.4. <b>Polímeros</b> .....	<b>27</b>
4.4.1. <b>Características de los polímeros de uso común</b> .....	<b>28</b>
4.4.2. <b>Polietileno de alta densidad (HDPE)</b> .....	<b>28</b>
4.4.3. <b>Polietileno de baja densidad (LDPE)</b> .....	<b>29</b>
4.4.4. <b>Polipropileno (PP)</b> .....	<b>30</b>
4.5. <b>Procesamiento de plásticos</b> .....	<b>32</b>
4.5.1. <b>Extrusión</b> .....	<b>32</b>
4.5.2. <b>Inyección</b> .....	<b>34</b>
4.6. <b>Propiedades mecánicas</b> .....	<b>37</b>
4.7. <b>La norma técnica ASTM D638</b> .....	<b>41</b>
5. ANTECEDENTES .....	43
6. METODOLOGÍA .....	46
7. DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA.....	52
8. DISEÑO MECÁNICO CAD.....	55
8.1. <b>Diseño del barreno</b> .....	<b>55</b>
8.2. <b>Diseño del cilindro y soporte de extrusión</b> .....	<b>57</b>

8.3.	Diseño de la tolva.....	58
8.4.	Diseño completo del sistema de extrusión .....	60
8.5.	Diseño de cilindro inyector .....	61
8.6.	Diseño del pistón .....	62
8.7.	Diseño de los elementos para los soportes del cilindro inyector ....	63
8.8.	Diseño de la palanca.....	64
8.9.	Diseño de la boquilla y acople .....	64
8.10.	Diseño completo del sistema de inyección.....	66
9.	SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS MEDIANTE SOFTWARE CAE. ....	67
10.	IMPLEMENTACION DEL SISTEMA.....	72
10.1.	Prototipado rápido .....	72
10.2.	Diseño y fabricación a escala real del prototipo.....	73
11.	INSTAURACIÓN DEL HARDWARE Y SOFTWARE DEL SISTEMA PARA ESTABLECIMIENTO DE PARAMETROS .....	87
11.1.	Control .....	88
11.2.	Variador de frecuencia.....	88
11.3.	Diseño del controlador de temperatura.....	89
11.4.	Análisis del control .....	94
12.	VALIDACIÓN DEL SISTEMA .....	97
12.1.	Diseño del molde de inyección .....	97
12.2.	Pruebas de inyección del material.....	100
13.	CARACTERIZACION DE LAS PROBRETAS.....	108
13.1.	Caracterización fisicoquímica por Espectroscopia RAMAN .....	108
14.	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA .....	112
14.1.	Prueba con ensayos de tracción.....	113
14.2.	Prueba con ensayos de flexión.....	123
15.	CONCLUSIONES .....	131
16.	TRABAJOS FUTUROS.....	133
17.	BIBLIOGRAFÍA .....	134



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Efectos del plástico en la salud humana por medio de exposición directa y ambiental. Fuente: [21].	23
Figura 2 Evolución paralela de los conceptos de “Desarrollo sostenible” y “Economía circular. Fuente: [23].	27
Figura 3 Estructura de los polímeros en función de la funcionalidad de los monómeros. Fuente: [26].	28
Figura 4 Datos de tensión de un axial para un HDPE. Fuente: [27].	29
Figura 5 Estructuras químicas: A. Polipropileno, B. Polietileno de baja densidad, C. Polietileno de alta densidad. Fuente: [29].	30
Figura 6 Maquina extrusora de plástico. Fuente: [34].	33
Figura 7 Maquina inyectora de plástico. Fuente: [26].	35
Figura 8 Variación de la presión dentro de la cavidad del molde. Fuente: [36].	37
Figura 9 Curva esfuerzo contra deformación real para la gráfica de esfuerzo contra deformación.	40
Figura 10 Dimensiones de la muestra de prueba de tracción según ASTM D638. Fuente: [37].	42
Figura 11 Metodología de Diseño Mecatrónico modelo en V. Fuente: [52].	46
Figura 12 Diagrama de flujo de la metodología. Fuente: propia.	51
Figura 13 Boceto a mano alzada de los subsistemas de (a) inyección y (b) extrusión.	54
Figura 14 Diseño CAD con las medidas del husillo dimensiones en milímetros. Fuente: propia.	56
Figura 15 Diseño CAD de (a) Cilindro extrusor y (b) Soportes Fuente: propia.	58
Figura 16 Diseño CAD y dibujo de la tolva, diseño de la tolva en SolidWorks. Fuente: propia.	59
Figura 17 Diseño CAD del Cilindro, tolva y barreno. Fuente: propia.	60
Figura 18 Sistema de extrusión CAD. Fuente: propia.	61
Figura 19 Diseño CAD y dibujo del cilindro, diseño del cilindro en SolidWorks. Fuente: propia.	62
Figura 20 Diseño CAD y dibujo del pistón, diseño del pistón en SolidWorks. Fuente: propia.	62
Figura 21 Dibujo CAD de piezas de sujeción, diseño de piezas de sujeción en SolidWorks. Fuente: propia.	63
Figura 22 Diseño CAD de piezas de sujeción, diseño de piezas de sujeción en SolidWorks. Fuente: propia.	64
Figura 23 Diseño CAD y dibujo de la palanca, diseño de la palanca en SolidWorks. Fuente: propia.	64
Figura 24 Diseño CAD y dibujo del acople, diseño del acople en SolidWorks. Fuente: propia.	65
Figura 25 Dibujo CAD de la boquilla, diseño de la boquilla en SolidWorks. Fuente: propia.	65

Figura 26 Sistema de inyección CAD. Fuente: propia.....	66
Figura 27 CAD del Sistema de inyección de dos etapas. Fuente: propia.....	67
Figura 28 Simulación térmica del sistema extrusor en SolidWorks. Fuente: propia. .....	68
Figura 29 Simulación térmica del sistema inyección en SolidWorks. Fuente: propia. .....	69
Figura 30 Simulación térmica de ambos sistemas en SolidWorks. Fuente: propia. .....	70
Figura 31 Simulación estática del sistema inyección en SolidWorks. Fuente: propia. ....	70
Figura 32 Simulación del factor de seguridad para el PP del sistema inyección en SolidWorks. Fuente: propia.....	71
Figura 33 Prototipo de inyección de dos etapas impresos en 3d, escalados en ½ del tamaño real. Fuente: propia. ....	73
Figura 34 Estructura a escala real. Fuente: propia. ....	74
Figura 35 Mecanizado de los cilindros. Fuente: propia. ....	74
Figura 36 Cilindro de extrusión e inyección mecanizados. Fuente: propia.....	75
Figura 37 Acoplamiento de los cilindros de los procesos de extrusión en inyección. Fuente: propia. ....	75
Figura 38 Encaje simétrico de la balinera con el cilindro de extrusión y el barreno. Fuente: propia. ....	76
Figura 39 Soportes que fijan la etapa de extrusión a la estructura. Fuente: propia. .....	76
Figura 40 Tolva fabricada a medida. Fuente: propia. ....	77
Figura 41 Montaje de los soportes y la tolva al cilindro extrusor. Fuente: propia...	77
Figura 42 Pistón del sistema de inyección. Fuente: propia. ....	78
Figura 43 Palanca del sistema de inyección. Fuente: propia. ....	79
Figura 44 Soportes del cilindro de inyección. Fuente: propia. ....	80
Figura 45 Boquilla de 5 milímetros del sistema de inyección. Fuente: propia. ....	81
Figura 46 Maquina prototipo con los sistemas de extrusión e inyección establecidos. Fuente: propia. ....	82
Figura 47 Diseño CAD y dibujo de la base del motor SolidWorks. Fuente: propia.	83
Figura 48 Posición del motor y conexión hacia el husillo. Fuente: Propia. ....	84
Figura 49 Simulación del factor de seguridad de la base del motor. Fuente: propia. .....	85
Figura 50 Simulación del desplazamiento de la base del motor. Fuente: propia. .	85
Figura 51 Maquina prototipo finalizada. Fuente: propia. ....	86
Figura 52 Diagrama de funcionamiento del sistema .....	87
Figura 53 Schneider Electric Altivar 61. ....	89
Figura 54 Esquema eléctrico de las resistencias y relé. Fuente: propia. ....	90
Figura 55 Componentes de control. Fuente propia. ....	91
Figura 56 Esquema eléctrico de todos los componentes usados para la realización del control. Fuente: propia. ....	93
Figura 57 Panel del control del prototipo. Fuente: propia. ....	94
Figura 58 Respuesta de la planta de temperatura. Fuente: propia.....	95

Figura 59 Respuesta de la planta con la función de transferencia. Fuente: propia.	96
Figura 60 Proceso de fabricación del molde. Fuente: propia.	99
Figura 61 Soporte del molde. Fuente: propia.	100
Figura 62 Polímeros HDPE y PP. O polímeros reciclados en forma de pellet. Fuente: propia.	101
Figura 63 Primeros intentos resultantes para molde con material azul y amarillo. Fuente: propia.	101
Figura 64 Resultado de inyección de material azul para fabricación de probeta. Fuente: propia.	102
Figura 65 Primer resultado de inyección para la mezcla azul-morado (AM). Fuente: propia.	104
Figura 66 Resultado fallido de inyección de material para probeta azul al someterse a altas temperaturas. Fuente: propia.	105
Figura 67 Probetas de pruebas resultantes de la mezcla de material amarillo con azul (AA) y morado con azul (MA). Fuente: propia.	106
Figura 68 Lote de probetas elaboradas de cada tipo para sometidas a ensayos mecánicos. Fuente: propia.	107
Figura 69 Máquina de Ensayos Raman. Fuente: propia.	109
Figura 70 Resultados Raman de la probeta azul. Fuente: propia.	110
Figura 71 Resultados Raman de la probeta AA. Fuente: propia.	110
Figura 72 Resultados Raman de la probeta AM. Fuente: propia.	111
Figura 73 Resultados Raman de la probeta AAM. Fuente: propia.	111
Figura 74 Máquina Universal de Ensayos. Fuente: propia.	113
Figura 75 Ensayo de tracción en probetas con la Máquina Universal de Ensayos. Fuente: propia.	114
Figura 76 Representación visual de la ejecución del software para ensayos de tracción. Fuente: propia.	115
Figura 77 Datos resultantes de los ensayos de tracción. Fuente: propia.	116
Figura 78 Ensayo mecánico de la mezcla AAM, probeta1 mostrando desprendimiento en forma de fibras lo que contribuye a su alto porcentaje de deformación. Fuente: propia.	117
Figura 79 Comportamiento del material A en los 5 ensayos realizados. Fuente: propia.	118
Figura 80 Comportamiento del material AA en los 5 ensayos realizados. Fuente: propia.	119
Figura 81 Comportamiento del material AM en los 5 ensayos realizados. Fuente: propia.	121
Figura 82 Comportamiento del material AAM en los 5 ensayos realizados. Fuente: propia.	122
Figura 83 Ensayo de flexión en probetas con la Máquina Universal de Ensayos. Fuente: propia.	124
Figura 84 Representación gráfica de un ensayo de Flexión por medio del software. Fuente: propia.	125
Figura 85 Datos resultantes de los ensayos de Flexión. Fuente: propia.	125

Figura 86 Fractura de probeta y visualización de fibras que la mantienen unida después de fracturación. Fuente: propia..... 126

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Comparativa de propiedades de polímeros relevantes en el reciclaje de plástico. ....	30
<b>Tabla 2</b> Tipos de plásticos, sus usos comunes, productos formados después de su reciclaje e índice de recuperación.....	31
<b>Tabla 3</b> Propiedades mecánicas respecto a la tracción del polietileno y polipropileno [42]. ....	42
<b>Tabla 4</b> Resume las propiedades mecánicas de la probeta elaboradas con PP-Azul. ....	118
<b>Tabla 5</b> Resume las propiedades mecánicas de la probeta elaboradas con PP-Azul y PEAD-Amarillo. ....	120
<b>Tabla 6</b> Resume las propiedades mecánicas de la probeta elaboradas con PP-Azul y PEAD-Morado. ....	121
<b>Tabla 7</b> Resume las propiedades mecánicas de la probeta elaboradas con PEAD-Amarillo+PP-Azul+PEAD-Morado. ....	123
<b>Tabla 8</b> Flexión para probetas A.....	127
<b>Tabla 9</b> Flexión para probetas AA. ....	127
<b>Tabla 10</b> Flexión para probetas AM.....	127
<b>Tabla 11</b> Flexión para probetas AAM. ....	128
<b>Tabla 12</b> Comparación de los resultados promedio de los ensayos realizados y los reportados en la literatura del PP y PEAD (HDPE) [31]. ....	129

## **AGRADECIMIENTOS**

En el momento de culminar este importante capítulo de nuestra vida académica, queremos expresar nuestra profunda gratitud a todas aquellas personas que han sido parte fundamental en este camino lleno de aprendizaje y crecimiento. Cada paso dado no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional de quienes nos rodean. En primer lugar, queremos agradecer a Dios por ser nuestra guía constante a lo largo de esta travesía académica. Su amor y fortaleza nos han dado la determinación para superar obstáculos y alcanzar metas que en algún momento parecían inalcanzables.

A nuestras familias, quienes son nuestros pilares fundamentales, les debemos un agradecimiento eterno. Su amor, apoyo y paciencia han sido nuestra fuente de inspiración. Cada palabra de aliento y cada gesto de comprensión han sido combustible para nuestros esfuerzos. Gracias por creer en nosotros y por ser nuestra red de seguridad en cada paso que dimos.

A nuestros respetados docentes, queremos expresar nuestra sincera gratitud. Sus conocimientos, orientación y dedicación han sido una luz en nuestro camino. Siempre dispuesto a brindar su tiempo y sabiduría, han dejado una huella indeleble en nuestra formación académica y personal.

Asimismo, deseo agradecer a Corporación Universitaria Unicomfauca por proporcionarnos un entorno propicio para el aprendizaje y desarrollo. Las instalaciones, recursos y oportunidades que nos ha brindado han sido de gran valor en nuestra formación.

De la misma forma, agradecemos sinceramente a Tecnoparque SENA Popayán y Tecnoparque SENA Cali por su valiosa contribución a nuestro desarrollo de nuestro proyecto. Su apoyo ha sido fundamental para el éxito de nuestra investigación.

En conclusión, este logro no es solo nuestro, sino el resultado de un esfuerzo colectivo de amor, apoyo y dedicación. A Dios, nuestras familias, a nuestros docentes, institución y a tecnoparque nodos Popayán y Cali, les expresamos nuestra más profunda gratitud por ser parte de este viaje. Su influencia perdurará

en cada paso que demos en el futuro.

## RESUMEN

Los procesos de manufactura son muy importantes para el desarrollo económico de cualquier país, estos procesos se enfocan en la fabricación o transformación de materiales crudos (materia prima) en elementos funcionales. Los constantes avances en investigación de materiales se enfocan en buscar mejores productos finales que tengan un impacto ambiental reducido y a su vez bajo costo en su producción. El problema de los plásticos radica en su durabilidad y su difícil degradación, lo que conduce a la contaminación ambiental y representa una amenaza para la vida marina y la salud humana.

Como solución, se propone un prototipo de inyección de 2 etapas, con el cual se busca promover la reutilización del plástico y generar un impacto positivo a nivel social y ambiental. Para esto se usa la metodología de diseño mecatrónico, que combina la ingeniería mecánica, electrónica y de control para crear una solución innovadora y sostenible como apoyo al manejo de plásticos y su impacto en el medio ambiente. La validación del prototipo se realiza en probetas inyectadas, las cuales se rigen por la norma ASTM D638, siendo sometidas a pruebas de tracción por medio de una máquina universal de ensayos con el fin de observar los datos que esta genera respecto a las propiedades mecánicas de cada probeta y también siendo aplicadas a la espectroscopia RAMAN para observar de manera gráfica y porcentual que tanto químicamente el componente del material usado en la probeta se encuentra realmente en ésta, además de analizar si existen otros componentes que hagan parte del polímero usado para la fabricación de la probeta, asegurando así la calidad y fiabilidad de los resultados obtenidos en el proceso de desarrollo de la máquina prototipo.

La finalización del proyecto concluye con la fabricación de una inyectora de 2 etapas que permite un proceso eficiente de transformación del polietileno. La primera etapa es la extrusión, donde el material se funde y se transporta a la siguiente etapa; esta segunda etapa es la inyección, donde el polietileno fundido se inyecta en moldes específicos para producir productos plásticos con formatos específicos.

Se identificaron variables críticas y parámetros óptimos para el procesamiento del

polietileno mediante extrusión e inyección, siendo el control de velocidad y temperatura fundamentales para un funcionamiento eficiente. La elección de acero inoxidable facilitó la transmisión disipación de calor en el sistema, así como su seguridad estructural. Los ensayos mecánicos en las probetas inyectadas demostraron que la adición de PP al PEAD mejora la flexibilidad del polietileno de alta densidad para su inyección, pero sus propiedades mecánicas pueden degradarse si la mezcla no es homogénea. De esta forma, los resultados obtenidos con la máquina prototipo validan la fabricación de productos útiles y promueven la reutilización de polímeros reciclados en Popayán.

**Palabras clave:** Extrusión, Inyección, Polietileno de alta densidad, Polipropileno, Economía circular.

## **ABSTRACT**

Manufacturing processes are very important for the economic development of any country, these processes focus on the manufacture or transformation of raw materials (raw materials) into functional elements. The constant advances in materials research are focused on finding better final products that have a reduced environmental impact and at the same time low production cost. The problem with plastics lies in their durability and difficult degradation, which leads to environmental pollution and represents a threat to marine life and human health.

As a solution, a 2-stage injection prototype is proposed, which seeks to promote the reuse of plastic and generate a positive social and environmental impact. For this purpose, the mechatronic design methodology is used, which combines mechanical, electronic and control engineering to create an innovative and sustainable solution to support the management of plastics and their impact on the environment. The validation of the prototype is performed on injected test tubes, which are governed by the ASTM D638 standard, thus ensuring the quality and reliability of the results obtained in the development process of the prototype machine.

The completion of the project concludes with the manufacturing of a 2-stage injection molding machine that allows for an efficient polyethylene transformation process. The first stage is extrusion, where the material is melted and transported to the next stage; this second stage is injection, where the melted polyethylene is injected into specific molds to produce plastic products with specific formats.

Critical variables and optimal parameters for polyethylene processing by extrusion and injection were identified, with speed and temperature control being critical for efficient operation. The choice of stainless steel facilitated heat dissipation transmission in the system, as well as its structural safety. Mechanical tests on injected specimens showed that the addition of PP to HDPE improves the flexibility of HDPE for injection, but its mechanical properties can degrade if the mixture is not homogeneous. Thus, the results obtained with the prototype machine validate the manufacture of useful products and promote the reuse of recycled polymers in Popayán.

**Keywords:** High density polyethylene, Polypropylene, Extrusion, Injection, Circular economy.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La utilidad mundial del plástico se ha visto incrementada de una manera significativa, debido a que es un material muy económico, resistente, práctico y que se puede adaptar de acuerdo a las necesidades de quien lo desee consumir [1]. Este es considerado un material sintético obtenido mediante reacciones de polimerización a partir de derivados de petróleo [2]. Cabe mencionar que los plásticos son uno de los principales contaminantes del medio ambiente, no sólo por su producción total, sino porque una vez convertidos en residuos, se distribuyen fácilmente por el planeta, principalmente en los océanos, convergiendo en los giros subtropicales [3]. En la literatura es considerado que los plásticos conforman entre el 60% y el 80% de la basura marina, afectando visualmente los lugares en donde están presentes estos residuos, impactando de manera negativa y económica el medio ambiente, la industria del turismo y el sector pesquero [4]. En este sentido, se prevé que el área marina experimente una concentración alarmante de microplásticos, lo que representa un riesgo ecológico significativo. Se proyecta que la cantidad de microplásticos en los océanos aumente hasta 50 veces en el futuro. Esta preocupante perspectiva se basa en las estimaciones que indican que la producción de plástico se duplicará considerablemente para el año 2040. Como resultado, se espera que los desechos plásticos en los océanos se cuadrupliquen para el año 2050 [5]. Vale destacar que, la contaminación por micro plásticos puede provocar daños en los diferentes procesos metabólicos, morfológicos, fisiológicos, de absorción y de comportamiento de los organismos y como consecuencia, sus impactos pueden ser representativos a nivel celular y ecosistémico [6], [7].

Por otro lado, Colombia es un país en desarrollo con una economía en constante crecimiento y esto se refleja en el consumo masivo de materiales y servicios, pero también en la generación indiscriminada de desperdicios; Este crecimiento trae consigo beneficios que permiten mejorar la calidad de vida del ser humano por sus diferentes aportes a los sectores de la salud, la construcción, el hogar, entre otros; pero también generan daño, debido a los malos hábitos para satisfacer el bienestar

en términos de generación de residuos, lo que significa que llegan grandes cantidades de residuos a vertederos o, peor aún, terminan contaminando los suelos o cuerpos de agua, agotando los recursos y contaminando el medio ambiente, ya que se producen gases de efecto invernadero [8].

En evidencia de lo anterior, en México, aproximadamente el 11% de los residuos generados son polímeros, cuya degradación es excesivamente lenta: hasta mil años dependiendo del polímero, debido a componentes que lo hacen altamente resistente al medio ambiente, ya que no se descomponen ni se oxidan a través del tiempo [[9]. Se reporta también que, en Perú, casi 950 mil toneladas de plástico se consumen al año, del cual el 56 % de los residuos plásticos que se generan terminan en un relleno sanitario, mientras que el 43 % llega a botaderos y termina en ríos y en el océano [10].

En este sentido, en el pacífico colombiano se determinó la densidad, distribución y tipos de micro plásticos en la superficie del agua del estuario de Buenaventura, para obtener 36 muestras en dos sectores: Estuario Interno y el Estuario Externo; el trabajo se llevó a cabo durante tres épocas: lluvia, transición y seca, en 2015 y 2019. En promedio, la densidad aumentó anualmente un 28,7 %. Adicionalmente, la densidad se aumentó en ambos años al incrementar la distancia desde la zona interna de la bahía, observándose una menor densidad en el Estuario Interno [11]. En esta línea, en el año 2013, el 83% de los residuos domiciliarios generados en Colombia fueron a los rellenos sanitarios y solo el 17% fue recuperado por recicladores para su reincorporación al ciclo, donde 81% de los 1102 municipios están disponiendo sus residuos en rellenos sanitarios y el 3,09% hace uso de las plantas de aprovechamiento. El Departamento Administrativo de Planeación Municipal, en Santiago de Cali, relata que durante el año 2011 se aprovecharon 400 toneladas de material reciclable del total generado (577.331 Toneladas), lo cual representa un 0,07%. Los esfuerzos por gestionar estos materiales se están evidenciando en países como Estados Unidos donde las tasas de reciclaje superan el 70% en materiales como el papel de oficina y el aluminio; mientras que alrededor

de un 30% en materiales como el tereftalato de polietileno [12].

Una de las soluciones válidas para la disminución del procesamiento de plástico de origen petroquímico es tener una nueva vinculación al proceso de producción reutilizándolo para generar nuevos productos útiles. Así se han realizado sistemas capaces de reutilizar el plástico reciclado mediante un sistema de moldeo a inyección estilo lineal para una extrusora de plástico reciclable [13], esto con el fin de reutilizar los plásticos desechados tornándolos piezas de utilidad [14].

En este sentido, procesos de extrusión e inyección, donde se reducen y se reutilizan los plásticos desechados, surgen como una solución al problema de contaminación ambiental, y el uso adecuado de los recursos naturales, contribuyendo al mejoramiento de la calidad de vida de la población y a la conservación del ecosistema [15].

A partir del problema del consumo excesivo de plásticos, y teniendo como principal preocupación demostrar una forma de materializar adecuadamente la reutilización de los polímeros, en esta investigación se plantea la siguiente pregunta ¿Cómo pueden los procesos de manufactura contribuir a la reutilización de los residuos plásticos de origen fósil generados en la ciudad de Popayán?

## 2. JUSTIFICACIÓN

El moldeo por inyección es, quizás, el método de transformación más característico de la industria de plásticos [16], y tiene el fin de convertir un material derivado de la materia prima en un producto final totalmente comercializable, listo para la adquisición por los consumidores. Aunque estos procesos generan una gran ganancia monetaria para las empresas con su producción y comercialización, la cantidad de desechos de plásticos se incrementa año a año debido a su uso desmedido. Tradicionalmente la gestión de los residuos se centró en un modelo de economía lineal, de uso y desecho, sin tener propuestas que valoricen el estado residual de los plásticos empleados, acumulándose en vertederos o en el medio natural [17]. Por su corto periodo de vida útil, estos productos se convierten rápidamente en residuos que perduran en el medio ambiente debido a su alta resistencia a la degradación, lo cual genera un gran problema socioambiental [18]. Con cada momento que transcurre crece el problema de la acumulación de residuos plásticos o poliméricos, pero con el tiempo también se han establecido investigaciones, proyectos y políticas (como la implementación de normas legislativas denominadas Política Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos en Colombia) respecto a la búsqueda de soluciones relacionadas con el reaprovechamiento de los desechos plásticos, [19]. De aquí se resalta que si existe una manera de que toda la basura plástica actualmente acumulada pueda aprovecharse para volverse comercializable, se generaría una economía circular, que brinde la capacidad de generar un valor agregado a los desechos producidos, teniendo en cuenta los impactos que estos provocan [19].

El aprovechamiento de todos esos residuos plásticos generados, es el camino a mantener activa la producción de la industria manufacturera sin generar motivos por los que deban dejar de operar o producir productos de materiales que en poco tiempo serían parte de un problema mayor que afecte a todos incluidos ellos mismo. De esta forma, se fomenta de manera beneficiosa la economía al extender la vida útil de los residuos plásticos y generar productos comercializables. Esto no solo beneficia a las industrias, sino también a la sociedad en general. El enfoque en el

aprovechamiento de los residuos plásticos promueve una economía sostenible, donde se busca mantener el valor de los productos, materiales y recursos en la economía durante el mayor tiempo posible. Al hacerlo, también se reduce al mínimo la generación de residuos y se promueve un uso eficiente de los recursos, lo que resulta en beneficios económicos y ambientales a largo plazo. [20].

Previamente ya fue comentado que la problemática asociada a la producción indiscriminada de plástico es un problema de orden mundial. Sin embargo, cabe resaltar que las afectaciones del plástico y su impacto en la salud humana siguen siendo poco conocidos. Sin embargo, la exposición al plástico se está extendiendo a nuevas áreas del medio ambiente y de la cadena alimentaria, ya que los productos de plástico existentes se fragmentan en partículas más pequeñas y concentran sustancias químicas tóxicas.

En general, los impactos del plástico sobre la salud humana se han enfocado estrechamente a etapas de su ciclo de vida, así como, a productos, procesos, o vías de exposición particulares ya que el tiempo que dura el plástico en degradarse tiende a ser nocivo tanto para la salud humana como para el medio ambiente (ver figura 1) [21].

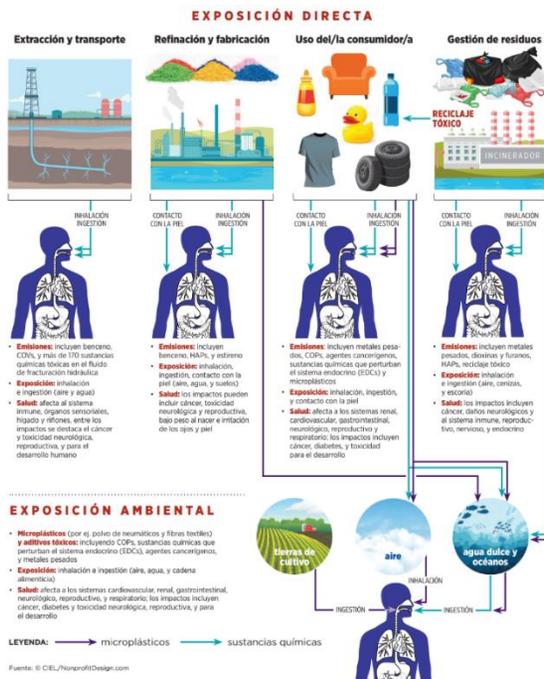


Figura 1 Efectos del plástico en la salud humana por medio de exposición directa y ambiental. Fuente: [21].

En este contexto, el desarrollo de sistemas de inyección de plásticos de dos etapas para el aprovechamiento de polietileno reciclado surge como una respuesta efectiva a la problemática de los residuos plásticos y sus impactos socioeconómicos y ambientales. La reutilización de estos residuos, en particular el polietileno, requiere una atención especial en términos de conocimiento y la identificación de parámetros clave para su máximo aprovechamiento. Mediante los procesos de extrusión e inyección, se busca obtener productos de alta calidad que puedan ser comercializados.

Este proyecto tiene el potencial de generar a futuro un impacto positivo en diversos aspectos. Desde el punto de vista empresarial, la producción y comercialización de productos derivados de desechos poliméricos crea oportunidades de negocio sostenibles, fomentando la economía circular y promoviendo la innovación en el sector. Además, al aprovechar de manera efectiva estos residuos, se contribuye a reducir la generación de basura, evitando su acumulación en vertederos y disminuyendo la demanda de plásticos vírgenes.

A nivel social, este proyecto puede generar empleos y promover la conciencia ambiental en la comunidad, involucrando a diferentes actores en la cadena de valor del reciclaje de plásticos. La reutilización del polietileno reciclado no solo reduce la contaminación ambiental, sino que también contribuye a la conservación de los recursos naturales al disminuir la extracción de materias primas.

En términos ambientales, este proyecto se alinea con los principios de la economía circular, la gestión sostenible de los recursos, así como algunos de los ODS. Al maximizar el aprovechamiento del polietileno reciclado, se evita la acumulación de residuos plásticos, se reduce la demanda de energía y se disminuye la emisión de gases de efecto invernadero asociados a la producción de plásticos vírgenes.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo general**

Desarrollar un sistema que permita el procesamiento y aprovechamiento de polietileno reciclado a través de los procesos de extrusión e inyección.

#### **3.2. Objetivos específicos**

- Implementar un prototipo de máquina inyectora de dos etapas.
- Establecer las condiciones adecuadas del sistema para el adecuado procesamiento del polietileno reciclado.
- Validar el sistema y los parámetros de inyección a través de ensayos mecánicos realizados a cuerpos de prueba inyectados.

## **4. MARCO DE REFERENCIA**

### **4.1. Marco teórico**

A seguir se presentan algunos conceptos afines con el desarrollo del presente proyecto, que buscan contextualizar el tema a ser tratado.

### **4.2. Contaminación**

Se denomina contaminación atmosférica o contaminación ambiental a la presencia de cualquier agente (físico, químico o biológico) o una combinación de varios agentes en lugares, formas y concentraciones tales que, sean nocivos para la salud, para la seguridad y el bienestar de la población, o puedan ser perjudiciales para los seres vivos en general. Se puede afirmar que la contaminación del aire y del agua, el ruido, las emisiones químicas, la contaminación alimentaria, el agotamiento del ozono y las consecuencias del cambio climático seguirán siendo los principales problemas relacionados con la salud humana en el mundo y que sus efectos serán cada vez más notorios [22].

### **4.3. Economía circular**

La economía circular es un paradigma cuyo enfoque es generar una prosperidad económica, proteger el medio ambiente y prevenir la contaminación, facilitando de esta manera el desarrollo sostenible.

Desde la revolución industrial en el siglo XVIII, las productividades de las empresas y la calidad de vida de la población global ha tenido un gran aumento, siendo esto una causa directa del crecimiento de la explotación de recursos naturales renovables y no renovables, que a su vez han generado una amenaza para el medio ambiente y la población global.

En este sentido, a principios del siglo XX por medio de propuestas de ambientalistas se ha creado la denominada economía verde, de la cual hace parte la economía circular con el fin de ayudar a la reducción de la degradación de recursos naturales, así como de la salud de la población global [23].

La figura 2, muestra la evolución del concepto de economía circular desde el sistema de economía lineal hasta la conceptualización actual de economía circular.

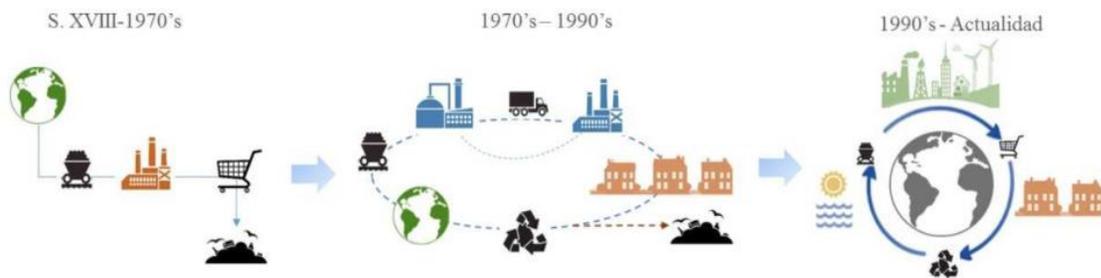


Figura 2 Evolución paralela de los conceptos de “Desarrollo sostenible” y “Economía circular. Fuente: [23].

La economía circular representa una posibilidad para mejorar el bienestar y la prosperidad del medio ambiente, fomentando la creación de valor y fortaleciendo el potencial innovador, lo que, a su vez, dará lugar a la creación de empleos. Además, el consumo cada vez mayor de recursos naturales se reducirá a medida que la economía circular se vuelva más popular [24].

#### 4.4. Polímeros

Los polímeros son una gran molécula construida por la repetición de pequeñas unidades químicas simples (ver Figura 3), donde en ciertos casos estas repeticiones pueden ser de tipo lineal, de forma semejante a una cadena con sus eslabones, también se pueden encontrar de forma ramificadas o interconectadas, formando retículos tridimensionales [25].

La longitud de la cadena del polímero viene determinada por el número que se repiten en la cadena. Esto se llama grado de polimerización (X), y su peso molecular viene dado por el peso de la unidad constitucional repetitiva multiplicado por el grado de polimerización [26].

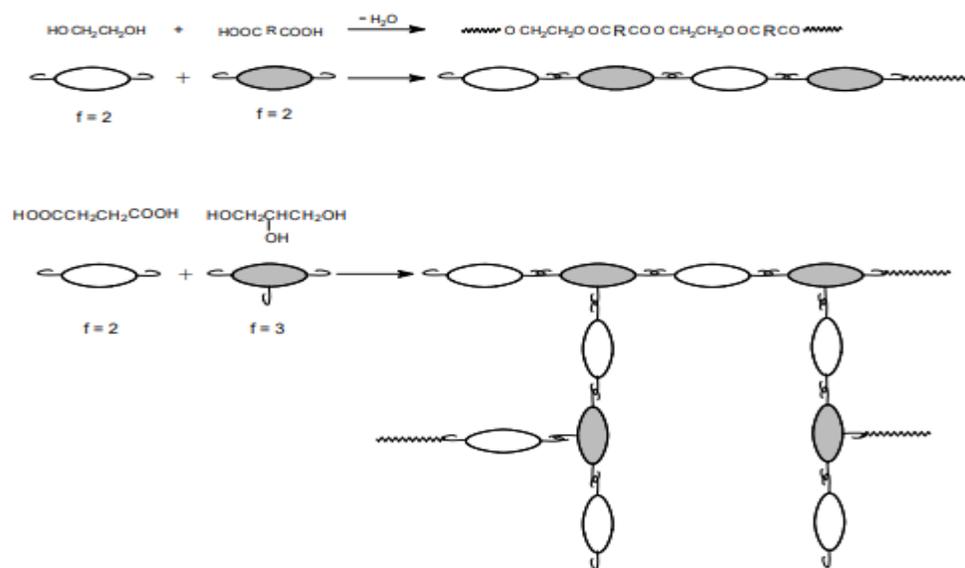


Figura 3 Estructura de los polímeros en función de la funcionalidad de los monómeros.  
Fuente: [26].

#### 4.4.1. Características de los polímeros de uso común

El término "plástico" se originó debido a su conexión con la propiedad de la arcilla de poder ser moldeada, aunque también se ha utilizado para hacer referencia a las artes conocidas como artes plásticas. Técnicamente, se refiere a ciertos materiales, tanto naturales como sintéticos, que pueden moldearse fácilmente y cuya estructura contiene principalmente derivados de celulosa, proteínas y resinas [27].

Existen diversos tipos de polímeros, que se clasifican en función de su estructura química y propiedades. Cada tipo de polímero tiene propiedades y aplicaciones específicas, lo que los hace adecuados para una amplia gama de industrias y usos. Algunos de los tipos de polímeros más comunes son: Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Policloruro de vinilo (PVC), Poliestireno (PS), Poliuretano (PU), Polietileno tereftalato (PET).

A seguir se describen, características de los polímeros a ser usados en el desarrollo de este proyecto.

#### 4.4.2. Polietileno de alta densidad (HDPE)

El polietileno de alta densidad es un polímero de adición lineal de etileno, producido a temperaturas y presiones similares a las utilizadas para Polietileno lineal de baja densidad (LLDPE), y con muy poca ramificación. Las láminas de HDPE son menos

flexibles que las láminas de LDPE, pero aún tienen cierta flexibilidad y su transparencia es menor. Su barrera de vapor de agua es mejor, al igual que su barrera de gas. El polietileno de alta densidad (HDPE) es un polímero semi cristalino que se usa comúnmente tanto en productos industriales como de consumo. La respuesta mecánica del HDPE es similar a la de muchos termoplásticos blandos en el sentido de que comienza a sufrir deformaciones viscoplásticas con deformaciones muy pequeñas. La figura 4 muestra la respuesta tensión-deformación de un HDPE probado en tensión uniaxial a tres velocidades de deformación diferentes (ver figura 4) [27].

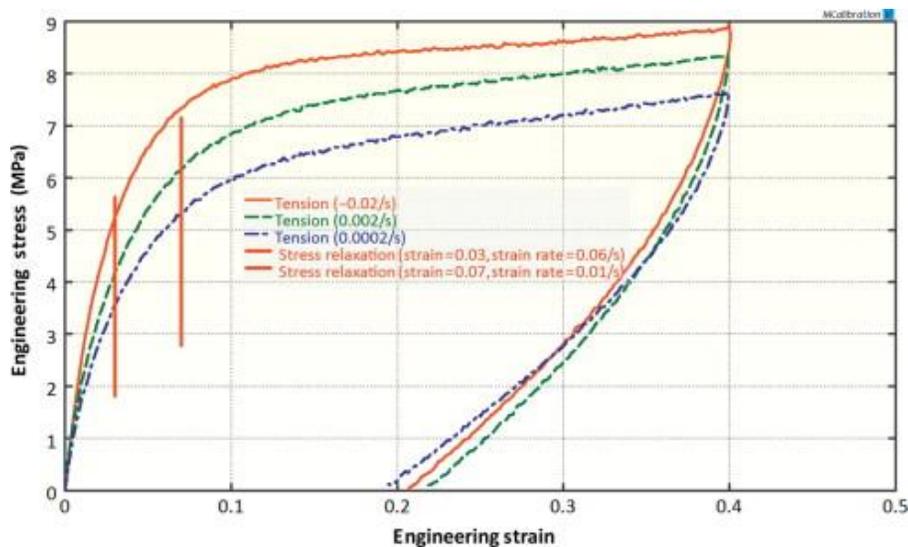


Figura 4 Datos de tensión de un axial para un HDPE. Fuente: [27].

#### 4.4.3. Polietileno de baja densidad (LDPE)

El LDPE fue el primer plástico en tener un uso comercial común en los envases, a fines de la década de 1940. Está polimerizado a partir de etileno y, a diferencia del HDPE, tiene una estructura muy ramificada, con ramificaciones largas y cortas, que interfieren con la cristalización. El porcentaje más bajo de cristalinidad le da al LDPE una densidad más baja que al HDPE, y lo hace más suave y flexible, además de disminuir un poco su capacidad de barrera. La buena resistencia química del LDPE, junto con su bajo costo, lo hacen excelente para muchas aplicaciones de embalaje flexible. Aunque es más transparente que el HDPE, el LDPE tiene un aspecto borroso. Se funde a una temperatura más baja que el HDPE, una desventaja cuando

se desea estabilidad térmica, pero generalmente una ventaja cuando se usa como capa de sellado térmico en un paquete flexible [28].

#### 4.4.4. Polipropileno (PP)

El propileno es un subproducto de la producción de etileno o de la refinación del petróleo y pertenece a la clase de poliolefinas. El polipropileno  $(C_3H_6)_n$  se crea mediante la polimerización del propileno  $(C_3H_6)_n$ . Durante la polimerización, se unen unidades monoméricas, que son sustancias insaturadas, mediante la apertura de su doble enlace o estructura de anillo. Este enlace se realiza sin separar las moléculas individuales, por lo que la composición porcentual del polímero es la misma que la del monómero original [29].

La figura 5 muestra las estructuras químicas del polipropileno, polietileno de baja densidad y polietileno de alta densidad.

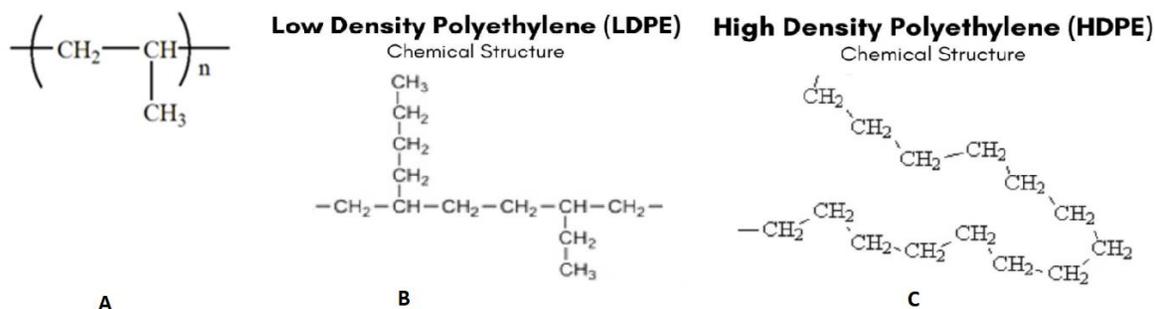


Figura 5 Estructuras químicas: A. Polipropileno, B. Polietileno de baja densidad, C. Polietileno de alta densidad. Fuente: [29].

En lo que respecta a la categorización de los desechos plásticos, esta puede proporcionar una orientación para comprender y abordar el problema de los residuos. A continuación, se presenta de manera resumida la Tabla 1, que muestra distintos tipos de plásticos junto con sus aplicaciones habituales y tasa de reciclaje [30].

Tabla 1 Comparativa de propiedades de polímeros relevantes en el reciclaje de plástico.

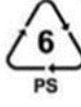
Polímero	Punto de fusión	Densidad	Aplicaciones
Polipropileno (PP)	160°C	0,895 y 0,92 g/cm <sup>3</sup>	Envases para alimentos, como vasos de yogur o margarina, envoltorios de caramelos o aperitivos, recipientes para microondas, fibras para alfombras, muebles de jardín, dispositivos

			médicos y sus envases, maletas, utensilios de cocina y tuberías.
Polietileno de baja densidad (LDPE)	110°C	0,910 a 0,940 g/cm <sup>3</sup>	Film transparente, bolsas de la compra, film agrícola
Polietileno lineal de baja densidad (LLDPE)	110°C	0,910 a 0,940 g/cm <sup>3</sup>	Film extensible, films para embalaje industrial, contenedores de paredes muy finas, bolsas pequeñas, medianas y para grandes cargas.
Polietileno de alta densidad (HDPE)	171°C	0,93 a 0,97 g/cm <sup>3</sup> o 970 kg/m <sup>3</sup>	Cajas y contenedores, botellas (para productos alimenticios, detergentes, cosméticos), recipientes para alimentación, juguetes, depósitos de gasolina, envoltorios industriales, tuberías y utensilios domésticos.

La clasificación de los desechos plásticos es una herramienta eficaz para abordar y resolver el problema de la gestión de residuos. La Tabla 2 ofrece una visión general de los diferentes tipos de plásticos, sus aplicaciones comunes y el índice de recuperación asociado a cada uno [30].

*Tabla 2 Tipos de plásticos, sus usos comunes, productos formados después de su reciclaje e índice de recuperación.*

Tipos de plástico	Código	Usos comunes	Producto formado después del reciclado	Actualmente reciclable	Índice de recuperación [%]
Tereftalato de polietileno (PET)		Recipientes para alimentos, botellas de plástico, láminas, vellón de poliéster, muebles.	Aislamiento de edificios, alfombras, botellas de refrescos, ropa, relleno de almohadas y sacos de dormir.	Si	19.5
Polietileno de alta densidad (HDPE)		Botellas más duraderas, madera plástica, piezas de automóviles, juguetes, bolsas de supermercado.	Contenedores de compost, contenedores de reciclaje.	Si	10
Cloruro de polivinilo (PVC)		Tuberías, juguetes, botellas no alimenticias, pisos	Cesto de basura	No	0

Polietileno de baja densidad (LDPE)		Contenedores, tubos, bolsas de plástico, películas de plástico	Láminas de pellets, bolsas de basura	Mayormente no	5
Polipropileno (PP)		Tapas de botellas, envases de alimentos, equipaje, vajilla, muebles, electrodomésticos	Láminas de pellets, tubos, cubos, piquetas.	A veces	1
Poliestireno (PS)		Utensilios de plástico, espuma de poliestireno, bandejas de cafetería	Papelera de reciclaje	A veces	1
Otros: polimetilmetacrilato, policarbonato, etc.		CD y DVD, algunos envases de alimentos, cepillos de dientes	Papelera de reciclaje	No	Varias

#### 4.5. Procesamiento de plásticos

El procesamiento de plásticos implica el uso de una considerable cantidad de energía para calentar las materias primas y transformarlas en productos. Además, es crucial eliminar el exceso de calor del proceso para lograr la solidificación del plástico y completar adecuadamente el proceso de fabricación. Este intercambio térmico es esencial para garantizar la calidad y la forma final del producto plástico. Requiere un equilibrio cuidadoso para lograr un procesamiento eficiente y satisfactorio. En este sentido, dentro de los procesos de transformación de plásticos, se destacan los procesos de extrusión e inyección [31] , [32].

##### 4.5.1. Extrusión

Una extrusora consta de varios componentes esenciales que desempeñan un papel crucial en su funcionamiento. En primer lugar, se encuentra el motor de accionamiento, que proporciona la energía necesaria para girar el husillo. El husillo, a su vez, es un componente central que impulsa el material a través de la extrusora. Junto con el husillo, se encuentra el barril, una estructura cilíndrica que alberga el husillo y proporciona un ambiente controlado para el proceso de extrusión. Dentro

del barril, se encuentra la zona de alimentación, donde se introduce el material en forma de pellets o gránulos. A medida que el material se desplaza a lo largo del husillo, entra en contacto con la zona de compresión, donde se funde y se mezcla de manera homogénea. Finalmente, en la zona de salida, el material fundido es forzado a través de una boquilla o matriz, adoptando la forma deseada antes de ser enfriado y solidificado (ver figura 6) [33].

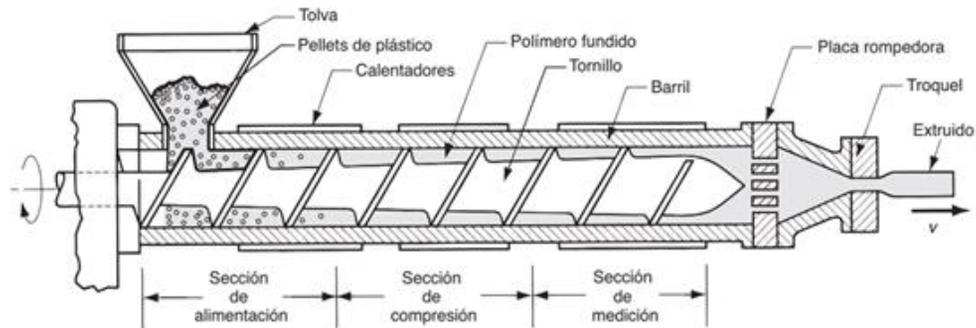


Figura 6 Máquina extrusora de plástico. Fuente: [34].

La mayoría de las extrusoras usan un solo tornillo en el cilindro. Este husillo generalmente tiene una rosca, pero también puede tener dos, y las roscas entre las roscas y el centro del husillo forman una ranura, manteniendo el mismo diámetro desde las roscas exteriores en toda la longitud del husillo hacia el cilindro. A seguir, se describen brevemente estos tipos de extrusoras:

**Extrusoras de un solo husillo:** Una configuración común para las extrusoras de un solo husillo consta de cuatro zonas distintas, que se extienden desde la entrada hasta la salida. Estas zonas están diseñadas para cumplir funciones específicas en el proceso de extrusión y garantizar un rendimiento óptimo. Cada zona tiene características y ajustes individuales que contribuyen a la fusión, mezcla, desgasificación y conformación del material durante el proceso de extrusión [34].

- **Zona de alimentación:** En esta parte ocurre el transporte del material en estado sólido y comienza la elevación de temperatura del material.
- **Zona de compresión:** En esta zona, el polímero es comprimido y está sujeto a fricción y esfuerzos cortantes, logrando una fusión efectiva.
- **Zona de distribución:** Aquí se homogeniza el material fundido y ocurren las

mezclas.

- **Zona de mezcla:** En esta parte, que es opcional, ocurre un mezclado intensivo de material, en muchos casos no se aconseja porque puede causar degradación del polímero.

Los husillos pueden tener también dentro de algunas de sus zonas principales elementos dispersivos y elementos distributivos.

- **Distribución:** Logra que todos los materiales se encuentren en igual proporción en la muestra.
- **Dispersión:** Logra que los componentes no se aglomeren, sino que formen partículas del menor tamaño posible.

**Extrusoras de doble husillo:** Los extrusores de doble husillo proporcionan un empuje mucho mayor que la de un sólo husillo, aceleraciones de material mucho mayores, esfuerzos cortantes relativamente altos y mezclado intensivo. Para algunos materiales este proceso es demasiado agresivo, por lo cual resulta inadecuado, existe la creencia de que los concentrados de color se realizan por lo general en este tipo de extrusores, sin embargo, la mayoría de los pigmentos sufren degradación debido a las condiciones tan agresivas del proceso, por ello, muchos fabricantes de concentrados utilizan un cañón largo de un solo husillo [34].

#### 4.5.2. Inyección

El moldeo por inyección de plástico es uno de los procesos de manufactura más utilizados en la industria; la producción en masa de piezas mediante este proceso es de suma importancia en diversos sectores industriales tales como el automotriz, el aeronáutico, el electrónico, el eléctrico, etc. La ventaja de utilizar polímeros en la producción de piezas reside en que son materiales resistentes, ligeros, económicos y versátiles.

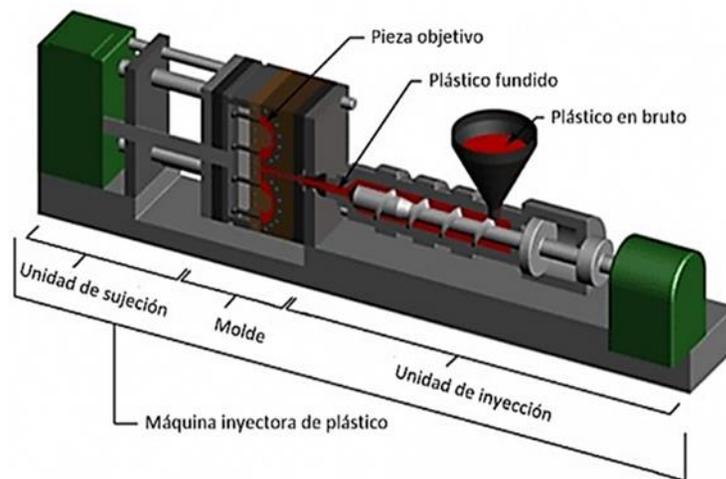


Figura 7 Máquina inyectora de plástico. Fuente: [26].

Un sistema de inyección consta de los siguientes componentes esenciales (ver figura 7):

**Tolva de alimentación:** Es el depósito donde se almacenan los gránulos de plástico que se utilizarán para el proceso de inyección. La tolva suministra de manera constante el material al sistema.

**Tornillo de plastificación:** El tornillo es el corazón del sistema de inyección. Se encarga de transportar, mezclar y fundir el plástico en forma de gránulos a través del calor generado por la fricción y la resistencia en el barril.

**Barril de plastificación:** Es un cilindro que aloja al tornillo de plastificación. Su función principal es proporcionar un ambiente controlado de temperatura y presión para fundir y mezclar adecuadamente el plástico.

**Unidad de cierre:** Consiste en una estructura que sujeta y mantiene las dos mitades del molde en su lugar. Utiliza un mecanismo de cierre, que puede ser hidráulico o mecánico, para aplicar la fuerza necesaria y mantener el molde cerrado durante el proceso de inyección.

**Molde:** Es una herramienta que tiene cavidades en las cuales se moldea el plástico fundido. El molde está diseñado para crear la forma y las características deseadas del producto final.

Adicionalmente se destacan los siguientes elementos en un sistema de inyección:

**Inyector:** Es la boquilla ubicada en la parte frontal del barril de plastificación.

Permite la introducción del plástico fundido en el molde.

**Sistema de control de temperatura:** Se utiliza para mantener una temperatura constante y controlada tanto en el barril como en el molde. Esto garantiza una correcta fusión del plástico y un enfriamiento adecuado del molde después de la inyección.

**Sistema de control de presión:** Monitorea y regula la presión del material fundido durante el proceso de inyección. Asegura que la cantidad adecuada de plástico sea inyectada en el molde y que se alcance la presión requerida para obtener un producto de calidad.

**Sistema de expulsión:** Después de que el plástico se haya enfriado y solidificado en el molde, se utiliza un sistema de expulsión para liberar el producto terminado del molde. Puede incluir eyectores, varillas de expulsión u otros mecanismos que expulsen el producto de manera segura.

Estos componentes trabajan en conjunto para llevar a cabo el proceso de inyección plástica, donde el plástico fundido se inyecta en el molde, se enfría y solidifica, y luego se expulsa para obtener el producto final.

El molde es el encargado de llevar a cabo el proceso de solidificación del material extruido e inyectado. Para ser apto en recibir el material inyectado, primero se necesita realizar un análisis térmico en estado estacionario para fijar las temperaturas iniciales en la pieza y el molde. Una vez obtenidas las temperaturas iniciales se procede a un análisis en estado transitorio para la fase de solidificación. Por último, se exporta la distribución de temperaturas en el molde y la presión de inyección para llevar a cabo un análisis termo estructural del molde.

En la figura 8 se presenta una gráfica donde visualiza la variación de presión que sucede dentro del molde [35].

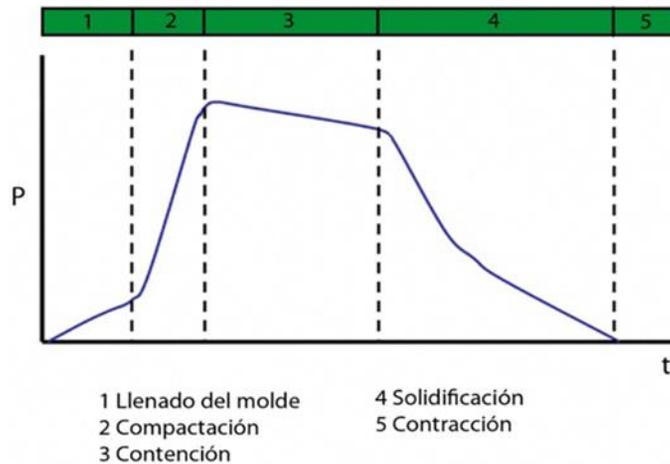


Figura 8 Variación de la presión dentro de la cavidad del molde. Fuente: [36].

**Sistema de refrigeración:** El sistema de refrigeración en un molde de inyección es muy importante para la productividad en el proceso de moldeo por inyección, ya que influye directamente en la calidad de la pieza moldeada.

El sistema de inyección por cada ciclo cuenta con tres etapas que rigen el proceso: llenado, enfriamiento y extracción del molde. Esto se especifica para resaltar la relevancia del sistema de enfriamiento, ya que, este ocupa el 75% del tiempo total del ciclo aproximadamente. El proceso de enfriamiento del molde se lleva a cabo mediante canales que se encuentran distribuidos dentro del cuerpo del molde. El calor extraído no puede ser reutilizado en otro proceso, pero se necesita mejorar la eficiencia en el proceso de transferencia de energía, basándose en el diseño de equipo y la selección de materiales, cuidando la configuración de la cavidad de la pieza [35].

#### 4.6. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas juegan un papel crucial en la caracterización de los polímeros, ya que determinan su resistencia, elasticidad y capacidad de soportar cargas y deformaciones. Estas propiedades son fundamentales para comprender el comportamiento y rendimiento de los materiales poliméricos en diversas aplicaciones. La resistencia a la tracción, la tenacidad, la flexibilidad y la rigidez son algunas de las propiedades mecánicas importantes que se evalúan. La comprensión de estas propiedades permite diseñar materiales poliméricos con propiedades específicas para satisfacer los requisitos de diferentes industrias, desde la

automotriz hasta la biomédica. Además, la caracterización de las propiedades mecánicas ayuda a predecir el rendimiento y la durabilidad de los productos poliméricos en condiciones reales, lo que contribuye a un desarrollo más eficiente y seguro de nuevos materiales

El ensayo de tracción es una prueba utilizada para evaluar las propiedades mecánicas de un material. Para probetas, se lleva a cabo aplicando fuerzas que tensionen el material desde las cabezas del cuerpo de ensayo, registrando la carga aplicada y la deformación experimentada. El ensayo permite determinar la resistencia, la ductilidad y el comportamiento del material bajo tracción. Proporciona información crucial para el diseño y la selección de materiales, así como para garantizar la calidad y la seguridad de los productos [36].

El esfuerzo se refiere a la fuerza aplicada sobre un material por unidad de área. Matemáticamente, se define como la razón entre la fuerza aplicada ( $F$ ) y el área transversal sobre la cual actúa ( $A$ ). Se expresa en unidades de presión, como Pascal (Pa) o Megapascal (MPa) [31].

La deformación se refiere al cambio en la forma o dimensiones de un material en respuesta a un esfuerzo aplicado. Puede ser una deformación elástica o plástica, dependiendo del comportamiento del material [37].

- Deformación elástica: Cuando se aplica un esfuerzo a un material, este puede deformarse elásticamente, lo que significa que recuperará su forma original una vez que se retire el esfuerzo. La deformación elástica es reversible y proporcional al esfuerzo aplicado.
- Deformación plástica: Si el esfuerzo aplicado excede cierto límite, el material puede sufrir una deformación plástica, lo que significa que no recuperará su forma original incluso después de retirar el esfuerzo. La deformación plástica es irreversible y puede ocurrir debido a deslizamiento, distorsión o fluencia del material.

La curva esfuerzo-deformación típica de un material muestra cómo varía el esfuerzo aplicado en función de la deformación resultante, ver figura 9. A continuación, se describirá cada una de las partes de una curva típica de esfuerzo-deformación para

un material elástico lineal [31].

- **Régimen elástico lineal:** En esta región inicial, el material se deforma elásticamente de manera proporcional al esfuerzo aplicado. La relación entre el esfuerzo y la deformación es lineal, y se rige por la ley de Hooke. El material sigue una trayectoria recta en la curva esfuerzo-deformación.
- **Límite elástico:** El límite elástico es el punto hasta el cual el material se deforma elásticamente. Si el esfuerzo aplicado excede este límite, el material puede sufrir deformación plástica y no recuperará su forma original al retirar el esfuerzo.
- **Régimen plástico:** Si el esfuerzo aplicado supera el límite elástico, el material entra en una región plástica donde la deformación es irreversible. Aquí, el material experimenta deformación plástica adicional sin un aumento significativo en el esfuerzo aplicado.
- **Punto de fluencia:** Es el punto en la curva donde se produce un aumento significativo de la deformación con un esfuerzo constante. Representa la transición del comportamiento elástico al comportamiento plástico.
- **Punto de fractura o rotura:** Si se continúa aplicando esfuerzo más allá del punto de fluencia, el material finalmente fallará y se romperá. En este punto, se alcanza la resistencia máxima del material.

Es importante destacar que la forma de la curva esfuerzo-deformación puede variar según el tipo de material y su comportamiento específico. Los materiales dúctiles, como el acero, tienden a tener curvas esfuerzo-deformación más extensas y suaves, mientras que los materiales frágiles, como el vidrio, muestran curvas esfuerzo-deformación más abruptas [31].

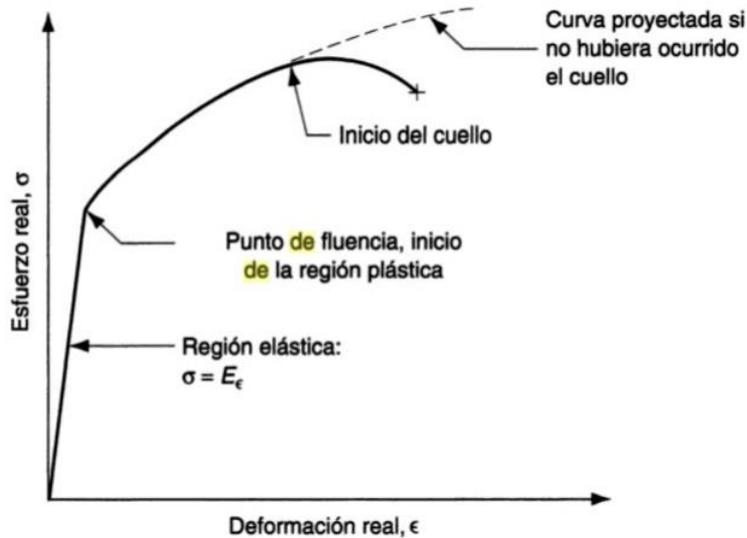


Figura 9 Curva esfuerzo contra deformación real para la gráfica de esfuerzo contra deformación

Según diversos estudios analizados, los cuerpos de ensayos más relevantes para realizar pruebas de tracción son las probetas, las cuales son las más frecuentes en el uso como objeto de estudio de la relación entre la fuerza aplicada y la deformación (siguiendo ciertas regulaciones).

Para la aplicación de un ensayo mecánico en una probeta, existe la deformación unilateral (deformación uniaxial), la cual, ocurre cuando el ensayo sólo se extiende en una dirección ya sea vertical u horizontal, es decir, manteniendo uno de los extremos del cuerpo de ensayo fijo, mientras que en el otro extremo se aplica sobre este una fuerza que tensiona todo el material para generar los parámetros que rigen el material con el que se haya fabricado la probeta. Cabe resaltar que las ecuaciones en las que se basa la búsqueda de estos parámetros se pueden evidenciar en las ecuaciones 1 y 2.

Ecuación 1

Deformación uniaxial [38].

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Ecuación 2

Módulo de elasticidad [39].

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}$$

$E$ : es el módulo de elasticidad, expresado en mega pascal [MPa].

$\sigma_1$ : el esfuerzo, en MPa, medida al valor de la deformación  $\epsilon_1$ .

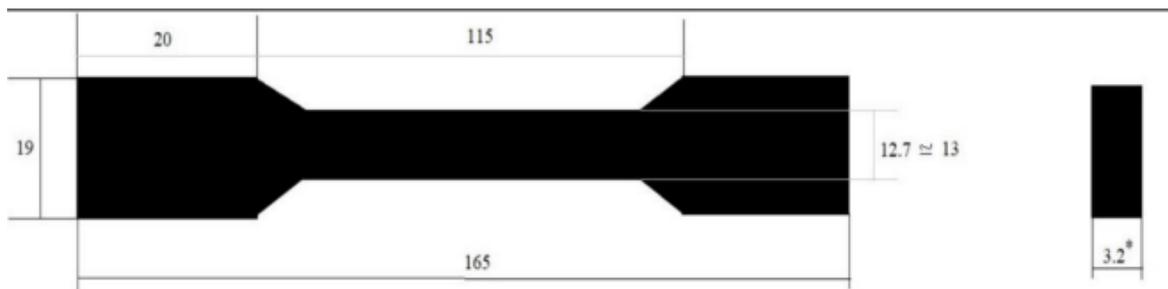
$\sigma_2$ : el esfuerzo, en MPa, medida al valor de la deformación  $\epsilon_2$ .

#### **4.7. La norma técnica ASTM D638**

Una prueba estándar para las propiedades de tracción de plásticos es la norma ASTM D638, comúnmente utilizada para determinar las propiedades de tracción de polímeros reforzados con fibras largas como fibras sintéticas o naturales, fibras en forma de esteras, fibras de carbono, Kevlar, etc [40]. Esta prueba se realiza preferentemente en una máquina de prueba universal y se utiliza para obtener datos básicos como la resistencia a la tracción, el módulo de tracción, el alargamiento y la relación de Poisson. La norma ASTM D638 se clasifica en dos tipos principales, Tipo I y Tipo IV, y ambos varían en los parámetros de dimensión de las muestras de ensayo preparadas. El tipo I se sigue comúnmente para especímenes moldeados por inyección, mientras que el tipo IV es utilizado para materiales más delgados.

El grosor de los especímenes de prueba bajo esta norma ASTM debe estar entre 1 y 14 mm, aunque el grosor más utilizado por la mayoría de los investigadores bajo esta norma es de 3,2 mm. La carga mecánica aplicada durante la fase de prueba debe estar entre 5 y 10 kN para probar polímeros simples y entre 30 y 50 kN para polímeros reforzados.

La forma del espécimen de prueba según la norma ASTM D638 debe replicar una forma de hueso de perro o una forma de mancuerna, como se observa en la figura 10. La velocidad de movimiento de la máquina de ensayos mecánico varía entre 5 mm/min y 500 mm/min, dependiendo de la ductilidad y el espesor de la muestra de prueba. Los experimentos llevados a cabo en materiales duros como la poliamida han utilizado una velocidad de cruceta de hasta 500 mm/min.



All dimensions are in mm.

\* Thickness can vary between 1 mm and 14 mm

Figura 10 Dimensiones de la muestra de prueba de tracción según ASTM D638. Fuente: [37].

Para visualizar de mejor manera parámetros relevantes en las pruebas de ensayos, se llevó a cabo una búsqueda del estado del arte donde se evidenciaron valores de las propiedades mecánicas de polímeros tanto vírgenes como reciclados, los cuales se obtuvieron al ser sometidas las probetas a estas pruebas de ensayos como se puede evidenciar en la tabla 3 (La tabla a seguir presenta algunos valores característicos obtenidos como propiedades mecánicas del material regidos por la normativa ASTM D638) [41].

Tabla 3 Propiedades mecánicas respecto a la tracción del polietileno y polipropileno [42].

Material	Resistencia tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Velocidad (mm/min)
HDPE Virgen	28	916	50
	21,4	-	5
	10,88	778	2
HDPE Reciclado	17,4	584	50
	23	349,9	-
	23,2	-	5
PP Virgen	38	1746	50
	24,1	500,25	50
	25	600	5
PP Reciclado	30,4	1474	50
	28	580	5

## 5. ANTECEDENTES

En el ejercicio de la investigación literaria con relación al proceso de extrusión e inyección se hallaron algunos trabajos. En un enfoque general, en otros países usan el plástico reciclado en la producción de concretos livianos y con resistencias moderadas a la compresión, en aras de minimizar el efecto negativo de este tipo de residuos sobre el medio ambiente [43].

Por consiguiente, entre los trabajos más relevantes en el dominio se encuentran el desarrollo de una tecnología para el reciclaje de polímeros de desecho en productos funcionales y de trabajo. Se compone de un dispositivo el cual almacena energía solar en un sistema de batería para alimentar la instrumentación de extrusión por fusión de polímeros de desecho (plásticos ABS y HDPE) en filamentos de impresora 3D. Se demostró que esta tecnología se puede utilizar en el paradigma de fabricación que sea autosuficiente y potencialmente capaz de abordar los desafíos de proliferación de plásticos en los países de desarrollo [38]. En un estudio se demostró el uso de energía renovable para el reciclaje de desechos plásticos el cual se utilizó para la fabricación de filamento de fundidos (FFF) a ser usados en impresión 3D, el sistema es capaz de reformar el ABS que se encuentra en los desechos electrónicos y los convierte en elementos funcionales a través del proceso de extrusión por fusión y fabricación aditiva [44]. La investigación aborda el potencial del reciclaje de polímeros de residuo posconsumo, desarrollando un robot extrusor capaz de fabricar filamentos de impresión 3D de calidad comercial, estos filamentos pueden ser personalizados en una amplia gama de termo polímeros y compuestos para estudios de ciencia de materiales y estudio de reciclabilidad [40].

La investigación de Aguirre et al, se enfocan en el desarrollo de una maquina extrusora para plásticos utilizando diferentes parámetros de diseño involucrados en cada uno de sus componentes, este sistema es tal que permite procesar polietileno de baja densidad en forma de pellets, donde se observa el proceso de extrusión y se obtiene el material plástico extruido [45].

Collahuazo et al, se centra en la fabricación de la maquina extrusora donde es necesario establecer una selección adecuada de cada uno de los elementos

mediante una matriz de selección denominada Pugh, con la matriz se optó por los elementos para la construcción de la maquina extrusora, ya que, es necesario establecer una adecuada elección de cada uno de los elementos y enfocándose más al costo de adquisición o fabricación del elemento de la máquina [46].

Por otro lado, Jimmy Joane et al, estudia en forma teórica los conceptos relacionados con la extrusión y diseña una máquina que permite la extrusión de termoplásticos, más específicos los polipropilenos (PP) [47].

El artículo de Á. A. Matías et al. analiza los desafíos del reciclado de residuos poliméricos, específicamente PET y PP, debido a su heterogeneidad y la dificultad de mantener sus propiedades durante el reciclado mecánico. El artículo propone una solución que consiste en utilizar formulaciones de PP/PET al 70/30 % en peso derivadas de residuos sólidos plásticos (PSW) en la fabricación de tuberías. El estudio examina el impacto del uso de PSW en la microestructura y las propiedades térmicas y mecánicas del material final, y también evalúa el uso de un armonizador para superar la insolubilidad natural entre los dominios del PP y PET. Los resultados del estudio indican que la formulación desarrollada con PET reciclado es un buen ejemplo de cómo los trabajos a escala de laboratorio pueden ser aplicables en la producción a escala industrial [48].

El trabajo de W. Geovanny Chicaiza Rivera, M. Morales Paola Janeth y Y. Zumba Luis Mateo, resalta la importancia de abordar la problemática de la contaminación plástica en Quito, donde se generan anualmente 112,420 toneladas de plástico. Como solución, se plantea la utilización de fibras de plástico en la fabricación de camisetas deportivas como una alternativa para reducir el impacto ambiental. El estudio empleó un enfoque mixto que combinó información cualitativa y cuantitativa. Como resultado, se concluye que las botellas de PET son un material que puede ser reciclado y convertido en tela utilizable en la producción de camisetas deportivas [49].

Asimismo, el aprovechamiento de bolsas plásticas de un solo uso como material textil en el diseño de prendas de vestir es una opción que presenta diversas alternativas y soluciones para la mejora del medio ambiente. La reutilización de

estas bolsas plásticas permite la creación de bolsos y accesorios, e igualmente se pueden combinar con otros materiales textiles secundarios con el fin de reducir la cantidad excesiva de bolsas plásticas [50]. Existe también el organizador de botellas para refrigeradores, el cual representa una solución práctica y respetuosa con el medio ambiente. Este organizador se fabrica utilizando carcasas de portátiles recicladas, evitando así que los plásticos terminen en vertederos o en la naturaleza. Este enfoque se considera una alternativa sostenible y funcional para mantener las botellas al alcance de la mano y mantener el refrigerador ordenado [51].

Por otra parte, la tecnología de impresión 3D ha experimentado un considerable crecimiento gracias a su versatilidad y diversas aplicaciones. No obstante, el uso de nuevos materiales termoplásticos ha generado una gran cantidad de residuos, por lo que es fundamental adoptar materiales reciclados y biológicos para minimizar el impacto ambiental. A pesar de los desafíos que surgen en términos de adherencia y degradación, se están buscando soluciones para mejorar las propiedades de las piezas impresas. En consecuencia, la selección adecuada de materiales resulta crucial, abriendo oportunidades de investigación en este ámbito [52].

En Colombia, se estima que se generan alrededor de 31.000 toneladas de residuos sólidos diariamente. De esa cantidad, aproximadamente 5.000 toneladas corresponden a plásticos, y solamente se recicla el 1,4% de este material. Para mejorar estos indicadores, es fundamental analizar el rol que desempeña la cadena de valor del reciclaje, comprendiendo en detalle sus componentes, actividades y actores involucrados. Esto permitirá identificar las barreras existentes en dicha cadena, proponer estrategias para superarlas y lograr un aprovechamiento más eficiente de los residuos [53].

## 6. METODOLOGÍA

El proceso de diseño para el sistema de fabricación de un prototipo de una inyectora de dos etapas se lleva a cabo siguiendo la metodología de diseño mecatrónico. Esta metodología proporciona una guía práctica y sistemática para desarrollar productos automatizados, considerando la aplicación del diseño en diferentes áreas como la mecánica, eléctrica, electrónica y de control [54]. La Figura 11, hace referencia a una representación esquemática de la metodología a seguir.



Figura 11 Metodología de Diseño Mecatrónico modelo en V.  
Fuente: [52].

La fabricación de máquinas manufactureras, trata de crear y ensamblar equipos y maquinarias para diversos sectores como automotriz, electrónica y construcción. Esta disciplina combina habilidades artesanales, ingeniería y tecnología para producir máquinas que cumplan de manera eficiente con su finalidad. Se aplican estrictos estándares de seguridad desde el diseño hasta la producción. La fabricación incluye etapas como selección de materiales, mecanizado, ensamblaje y pruebas de funcionamiento. La precisión, eficiencia e innovación son elementos clave para ofrecer soluciones efectivas y contribuir al avance tecnológico en la industria. Con lo anterior mencionado, es necesario establecer unos pasos a seguir que permitan de la mejor manera posible el desarrollo de este proyecto.

### A: Identificación De Parámetros De Diseño

El objetivo de esta fase fue establecer una base sólida para el diseño y la

implementación del sistema de inyección de plástico reciclado de dos etapas. Para esta fase se lleva a cabo una búsqueda acerca de otros proyectos e investigaciones que abordan la temática, además de las consecuencias que impulsan estos proyectos para asentar los objetivos a alcanzar con este trabajo.

De manera más contextualizada, para esta fase inicial las actividades para llevar a cabo la identificación de los parámetros de diseño son:

- Revisión de un estado del arte de sistemas de extrusión inyección (Antecedentes).
- Revisión de estado del arte del proceso procesamiento de plásticos reciclados (Antecedentes).
- Establecer especificaciones para el diseño de funcionamiento y estructural.

## **B: Construcción Del Prototipo A Escala**

En la segunda fase, se procede a la construcción del prototipo a escala de la máquina extrusora e inyectora, que permitirá llevar a cabo pruebas adecuadas para evaluar el acople y transporte del material plástico reciclado. Se inicia con la elaboración de un bosquejo y la definición del diagrama general de funcionamiento del sistema. Luego, cada pieza individualizada del prototipo es diseñada en software CAD, para luego ser evaluada en un sistema a escala, donde se fabrica cada pieza a través de impresión 3D. De esta manera, se busca comprobar que cada pieza de la máquina funciona correctamente y se acopla adecuadamente al sistema en su conjunto, garantizando la funcionalidad y la eficiencia del prototipo.

De manera más específica, para esta fase las actividades representativas a llevar a cabo para el desarrollo del prototipo a escala son:

- Establecer el diagrama de funcionamiento del sistema.
- Se realiza el diseño de cada una de las piezas utilizando el software CAD SolidWorks. Este programa permite crear modelos tridimensionales precisos y detallados de las piezas del sistema.
- Ensamble simulado general de todas las piezas en el software.
- Escalamiento (minimización) de cada pieza de la máquina e impresión 3D de cada pieza.

- Diseñar una estructura que optimice la forma de todas las piezas, brindando un soporte fundamental para el funcionamiento global de la máquina.
- Ensamble simulado entre la máquina extrusora inyectora fabricada en 3D y la estructura diseñada.

### **C: Simulaciones para la elaboración del sistema a escala real**

Después de la etapa de diseño y construcción del prototipo a escala, se lleva a cabo la fase de simulación de cargas estáticas y térmicas. Para esta fase, se utilizan herramientas de software CAE (Computer Aided Engineering) para analizar y validar el sistema, permitiendo obtener información precisa sobre el comportamiento estructural del prototipo. También, se usan herramientas CAM (Computer Aided Manufacturing) para generar los programas de mecanizado necesarios para la producción de las piezas. De esta manera, se logra una mayor eficiencia y precisión en la fabricación, asegurando la calidad y funcionalidad del prototipo.

Vale destacar que, de esta forma se pueden realizar ajustes en el diseño antes de la implementación a escala real.

Para el cumplimiento de esta fase, resaltan las actividades como:

- Simulación estática y térmica del sistema.
- Identificación y simulación (por medio de programas como proteus y CadeSimu) del sistema de control y software para poder desarrollar de la manera más eficiente posible los circuitos de control de variables que regirán al sistema.
- Búsqueda de materiales a escala real que compondrán la máquina.
- Mecanizado (por medio de una máquina CNC SMTCL, FAST MILL VMC 85OE) de los elementos con medidas específicas para la máquina.

Cada elemento que compone la máquina debe funcionar de manera eficiente en el sistema, por lo cual se resalta la necesidad de las simulaciones llevadas a cabo en cada pieza para analizar su comportamiento al generar un entorno en el que estas se destacarán según su función (como lo es cuando el sistema esté en altas temperaturas, ya que, se observará cualquier riesgo de deformación de los materiales o algún tipo de obstaculización que algún elemento pueda generar una

vez la máquina sea puesta en marcha).

#### **D: Implementación del sistema**

Una vez que se han realizado las simulaciones y se han optimizado los parámetros de diseño, se procede a mecanizar las piezas del prototipo. Para ello, se utilizan máquinas de mecanizado adecuadas para garantizar la calidad y precisión de las piezas fabricadas. Con las piezas mecanizadas, se realiza la implementación a escala real del sistema extrusor-inyector, lo que permitirá evaluar su desempeño en condiciones reales y validar los resultados obtenidos en las simulaciones. Cabe resaltar con lo anterior mencionado que al implementar el sistema se deberá llevar a cabo una programación que designe las instrucciones a seguir por los componentes electrónicos del circuito que regirá al sistema. En otras palabras, para especificar de mejor manera la fase final, esta se compone primordialmente de las siguientes actividades:

- Ensamble de los componentes hardware y software.
- Uso de software de programación (Arduino IDE) para la introducción de los comandos a tener en cuenta en el funcionamiento de cada dispositivo programable.
- Implementación final de la máquina extrusora-inyectora.

#### **E: Validación funcional del sistema**

Con la máquina ensamblada y los sistemas de extrusión e inyección en ejecución, para esta fase es esencial determinar los valores finales de las variables de temperaturas y velocidad, por lo cual, es importante generar cuerpos de ensayo a partir de la máquina mediante la fabricación de un producto sugerido a través de la búsqueda del estado del arte y normativas, el cual, de manera experimental permita ser evaluado su estado o condición una vez producido, con el fin encontrar los mejores resultados o datos posibles que conduzcan a los mejores parámetros bajo los cuales se dio la producción del cuerpo de ensayo mejor resultante. De manera más contextualizada, esta fase se rige bajo las siguientes actividades:

- Establecer parámetros del sistema para el adecuado procesamiento del polietileno reciclado.

- Revisión y posible recalibración de los parámetros de la máquina.
- Realización de ensayos mecánicos siguiendo la norma ASTM D 638 (por medio de una máquina de ensayos universal HUNG TA instrument Go, ttd) y caracterización propiedades del material por medio de ensayos RAMAN (Con una máquina de pruebas RAMAN Thermo SCIENTIFIC DXR SmartRaman) en los cuerpos de prueba fabricados a partir de la máquina
- Validación del material inyectado con los datos obtenidos de los ensayos mecánicos realizados a cuerpos de prueba.
- Retroalimentación y análisis de los resultados en la búsqueda de posibles optimizaciones o mejoras del proceso y del material inyectado

Se resalta que las actividades de mecanizado se llevaron a cabo en conjunto con el Tecnoparque SENA de la ciudad de Popayán del departamento del Cauca. Por otro lado, las actividades de ensayos o pruebas mecánicas junto con caracterización de materiales se llevaron a cabo con el Tecnoparque SENA Nodo Cali del departamento Valle del Cauca.

Para la fabricación de una máquina industrial dedicada a los procesos de manufactura se requiere una compleja guía a seguir según la forma en la que se destacarán los procesos que se lleven a cabo en ella. Para el desarrollo del sistema de inyección de plástico reciclado de dos etapas se estableció un diagrama que abarcará los pasos a tener en cuenta de manera general para realizar la máquina y validar su funcionalidad, como se puede observar en la figura 12.

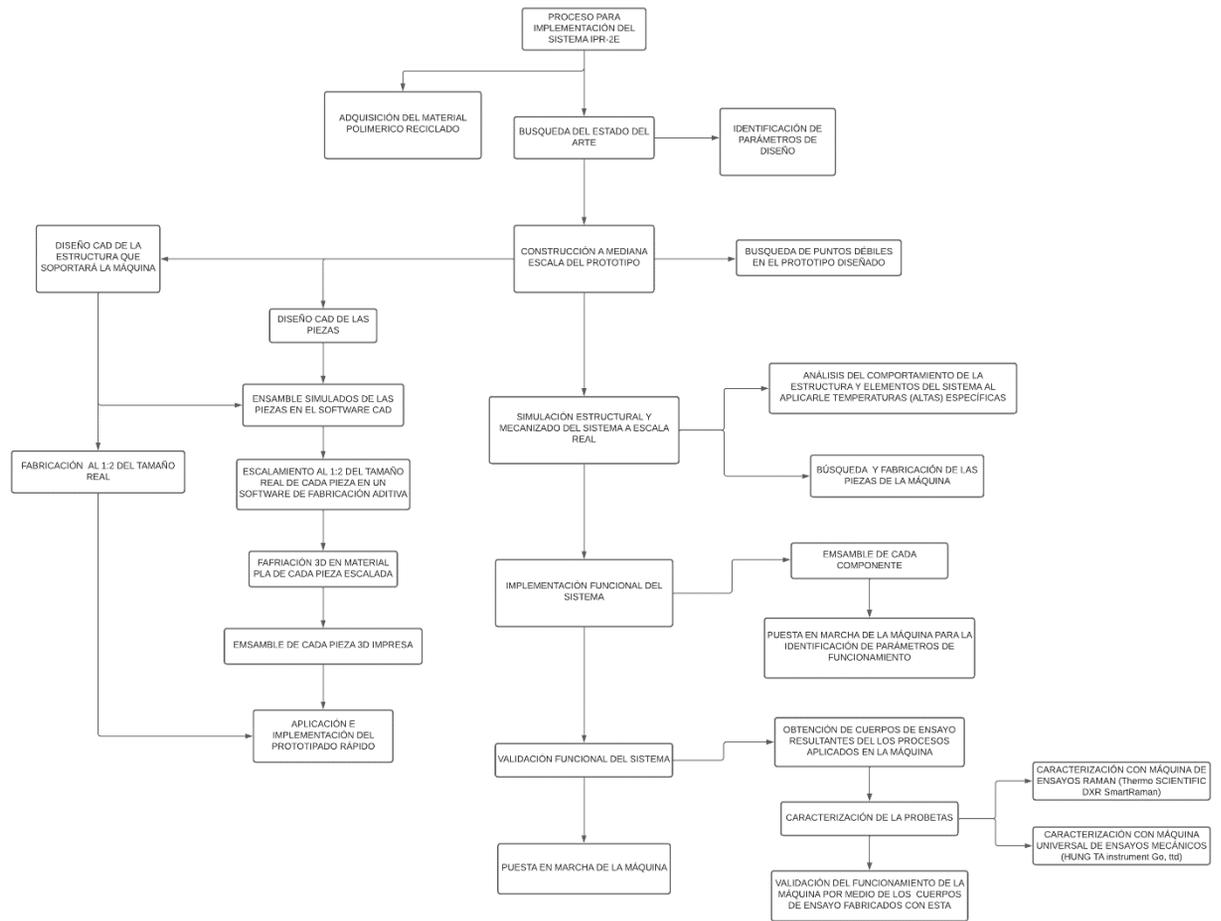


Figura 12 Diagrama de flujo de la metodología. Fuente: propia.

## 7. DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA

Como se mencionó previamente, una máquina de inyección de dos etapas para el procesamiento y aprovechamiento del material polimérico reciclado es una propuesta innovadora que puede llegar a generar flujos de ingresos sostenibles para el sector, al tiempo que contribuye significativamente a la preservación del medio ambiente. Este tipo de sistema requiere una combinación eficiente de técnicas de extrusión e inyección para procesar de manera óptima el material plástico reciclado. Al utilizar estas técnicas en conjunto, se maximiza el aprovechamiento de los recursos al reducir al mínimo el desperdicio de material durante el proceso. La extrusión se encarga de preparar y transformar el polietileno reciclado en una forma adecuada, mientras que la etapa de inyección permite dar forma y estructura final al producto deseado. Mediante un enfoque integral que incluye una gestión adecuada de los residuos, este sistema tiene el potencial de diseñar e implementar una solución eficaz para el procesamiento y aprovechamiento del polietileno reciclado, abriendo así nuevas oportunidades en términos económicos y medioambientales.

Un sistema de extrusión e inyección para plástico reciclado está compuesto por varias partes principales que deben ser diseñadas y seleccionadas cuidadosamente para lograr un prototipo funcional. A partir de investigaciones y prototipos existentes, se han establecido características clave para el diseño, entre las cuales destacan:

**Tolva de alimentación:** Es la parte del sistema donde se coloca el plástico reciclado antes de ser procesado. Debe ser adecuada para la cantidad de material a procesar y diseñada de manera que permita una alimentación uniforme y constante al sistema.

**Extrusor:** Es la parte del sistema encargada de fundir y mezclar el plástico reciclado para obtener una masa homogénea y fluida que pueda ser transportada hacia la siguiente etapa. Para construir un prototipo funcional, es importante controlar la temperatura del material para asegurar una fusión adecuada y un procesamiento óptimo.

**Cilindro de inyección:** Este componente del sistema mantiene el material en

estado fluido para ser inyectado a alta presión en el molde y obtener la pieza deseada. Destaca el cabezal de inyección, que limita la presión de inyección para asegurar una distribución uniforme del material y el llenado completo del molde. Es importante destacar que, en un sistema de inyección de dos etapas, se requiere un acople adecuado entre el componente de extrusión y el de inyección para garantizar un transporte eficiente del material fundido del extrusor al cilindro de inyección.

Todas las partes del sistema deben estar diseñadas para resistir las altas temperaturas y fuerzas de presión generadas durante el proceso de extrusión e inyección. Esto implica el uso de materiales resistentes al calor y al desgaste, así como un diseño robusto y preciso.

Adicionalmente son necesarios otros materiales como lo son: husillo, soportes, acople, pistón, boquilla, palanca.

Para el sistema electromecánico, encargado del control de velocidad del giro del husillo, se requieren los siguientes componentes:

**Motor con caja reductora:** Es un elemento muy relevante en el sistema, ya que, este genera y determina el movimiento que se aplicará al tornillo extrusor o husillo, encargado de transportar el material hasta su área de inyección. Cabe resaltar que la caja reductora del motor se tomó en cuenta debido a su arranque, es decir, tener una caja reductora permite reducir la velocidad de arranque evitando movimientos involuntarios que puedan perjudicar al usuario y permitir estar en un rango más asertivo respecto a la velocidad mínima con la que se debe llevar a cabo el proceso con el polímero.

**Variador de frecuencia:** Es un componente de gran importancia, ya que tiene la capacidad de controlar la velocidad de rotación del motor. Su función principal es generar las revoluciones por minuto (rpm) necesarias para obtener resultados óptimos en el proceso de inyección.

En relación al sistema electrónico de control de temperatura, se necesitaba un controlador de temperatura, del cual se consideró un control ON/OFF. Este tipo de control es efectivo y tiene un costo bajo, lo que lo hace una opción viable y

económica de implementar.

La figura 13, presenta los bosquejos conceptuales de los sistemas de extrusión e inyección, en base a los componentes definidos anteriormente.

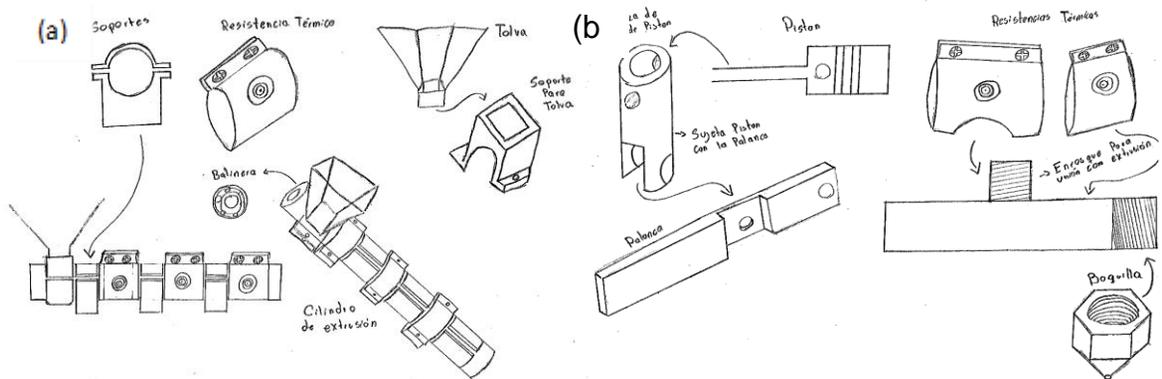


Figura 13 Boceto a mano alzada de los subsistemas de (a) inyección y (b) extrusión.

Los diagramas proporcionan una base para generar nuevas ideas sobre cómo llevar a cabo el proyecto de acuerdo con el objetivo general. Los bocetos iniciales establecen las condiciones iniciales en las que se proponen las ubicaciones de las etapas que controlan los procesos de extrusión e inyección. A partir de estos bocetos, se pueden desarrollar y refinar aún más las estrategias y consideraciones específicas para la implementación exitosa del proyecto.

## **8. DISEÑO MECÁNICO CAD**

Los diseños mecánicos desempeñan un papel crucial en la creación de sistemas y componentes mecánicos eficientes y funcionales. En particular, el uso de software CAD ha revolucionado la forma en que se diseñan y desarrollan estos sistemas ya que permite representaciones virtuales tridimensionales, así como, análisis simulados de comportamiento y rendimiento. En el caso del sistema de inyección, el software CAD garantiza diseños precisos y optimizados, asegurando su funcionalidad y rendimiento.

A partir de los bosquejos realizados a mano, se procedió a desarrollar el diseño en CAD utilizando SolidWorks. Durante este proceso, también se definieron los materiales que se utilizarán para la construcción del sistema.

A seguir se presentan, los diseños de las piezas fundamentales que componen el sistema de inyección de dos etapas.

### **8.1. Diseño del barreno**

Unos de los elementos principales en un sistema de extrusión/inyección es el husillo, ya que, este es el encargado de llevar a cabo tanto el proceso de extrusión como el de transportar el material en su estado final hasta el cilindro de inyección. Cabe resaltar que los husillos son relevantes porque pueden soportar fuerzas de torsión gracias a su diseño enfocado a las fuertes fricciones con materiales sólidos.

En términos generales, los husillos utilizados en la producción de plásticos tienen una relación común de longitud a diámetro de 20:1 o 30:1 [55]. De la práctica se considera que aumentar la longitud del husillo puede mejorar la distribución de temperatura en el polímero, ya que, la transferencia de calor generada por las resistencias provoca un gran aumento en la temperatura interna del cilindro, la cual, recorre a través del husillo, por lo que al ser mayor su longitud, también mantendrá en cierto estado el polímero hasta su último punto de contacto llegando finalmente al cilindro donde se inyectará. [56].

Con base en los elementos disponibles a nivel local, así como al presupuesto disponible, se identificó que un elemento usado generalmente para extruir y a su vez transportar material sería el barreno (el cual llevaría a cabo el trabajo del husillo,

gracias a su similitud y utilidad capaz de aportar al proceso), ya que, pueden soportar fuerzas de torsión gracias a su diseño enfocado a las fuertes fricciones con materiales sólidos. A su vez, es compatible la proporción longitud-diámetro mencionada, puesto que tiene una longitud de 30 cm y un diámetro de 1 pulgada en su zona de trabajo.

Con lo anterior mencionado, se consideró llevar a cabo la adquisición de un barreno estándar para que actúe como husillo del sistema, esto teniendo en cuenta que era más asequible realizar su compra que mecanizar su diseño y al ser este el eje central para el proceso de extrusión iniciar el diseño del sistema en base a las medidas de este elemento.

Con el fin de poder llevar a cabo los diversos diseños de las piezas, ensambles y simulaciones, es necesario contar con el diseño del barreno. Al medir el barreno estándar adquirido, se obtienen las dimensiones necesarias para crear el diseño CAD correspondiente, como se muestra en la figura 14.

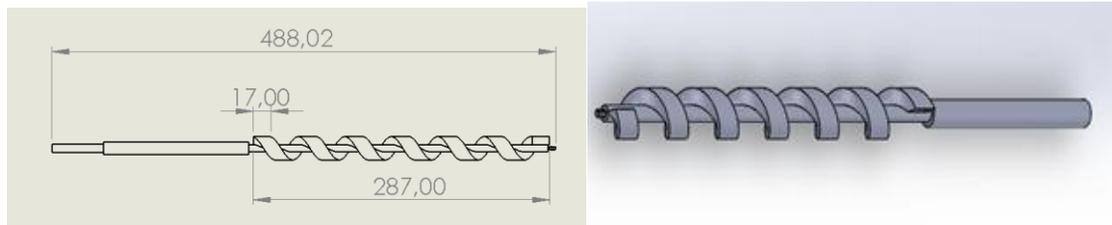


Figura 14 Diseño CAD con las medidas del husillo dimensiones en milímetros. Fuente: propia.

El flujo de arrastre sin presión o rendimiento es un parámetro crucial en sistemas de este tipo. Este parámetro se puede calcular utilizando la ecuación 1 [57], que en el caso de husillos individuales es la siguiente:

Ecuación 3

$$\text{Flujo de arrastre} = \frac{[0.95 \cdot \pi \cdot D \cdot 2 \cdot H \cdot \left(L - \frac{W}{L}\right) \cdot RPM \cdot (\sin\theta \cdot \cos\theta)]}{2}$$

Donde:

- L/D = 30:1
- Diámetro interior D = 5 mm
- Profundidad del canal H = 10 mm

- Profundidad del filete  $L = 27$  mm
- Anchura del canal  $W = 17$  mm
- Angulo de la hélice  $\theta = 15^\circ$
- Velocidad de extrusión RPM a RPS =  $35 \text{ RPM} = 0.583333 \text{ RPS}$

Con esto se determinó que el valor de  $1147,74 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  será la cantidad máxima de material que se transportará a través del sistema.

### **8.2. Diseño del cilindro y soporte de extrusión**

El tubo galvanizado utilizado en el diseño tiene una longitud de 31.5 cm, con un diámetro interior de 2.524 cm y un diámetro exterior de 2.8 cm. Este tubo ha sido diseñado con una ranura para encajar una tolva, cuya boca más pequeña mide 22.40 mm. Además, se ha realizado un pequeño desbaste en uno de los orificios del tubo para permitir la entrada de una balinera, la cual facilita el giro del barreno y asegura que esté centrado. Para sostener el cilindro extrusor, se han construido soportes que se sujetarán a la estructura del prototipo mediante tornillos. Estos soportes también proporcionan la altura necesaria para que el cilindro se acople al cilindro inyector, tal como se muestra en la figura 15. El diseño del prototipo se ha enfocado en su modularidad, permitiendo futuros cambios o limpiezas para su uso

en diversas aplicaciones.

(a)



(b)

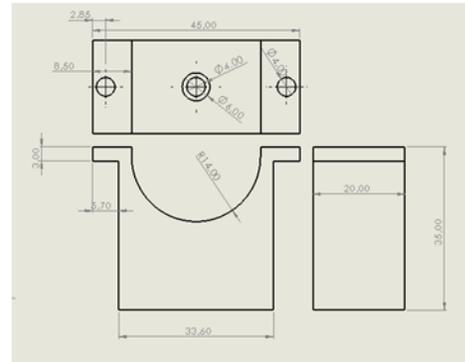
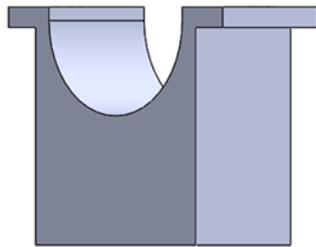


Figura 15 Diseño CAD de (a) Cilindro extrusor y (b) Soportes Fuente: propia.

### 8.3. Diseño de la tolva

En la figura 16 se pueden observar las diferentes vistas de la tolva de alimentación del sistema. En términos generales, se diseñó la tolva con una capacidad de 1200 gramos de material. Para la fabricación de la tolva, se usó una lámina de acero inoxidable donde se realizaron cortes triangulares para luego ser soldada. El material que pasara por la tolva es polietileno de alta densidad, así como polipropileno. Estos materiales fueron elegidos debido a su capacidad de ser

procesados mediante los métodos de extrusión e inyección.

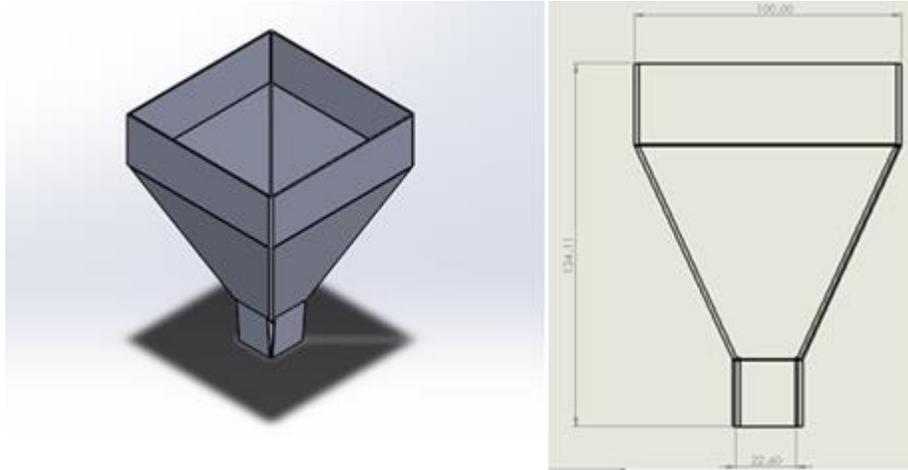


Figura 16 Diseño CAD y dibujo de la tolva, diseño de la tolva en SolidWorks. Fuente: propia.

La tolva facilita el proceso de transporte del material sólido hacia el interior del cilindro por medio de la gravedad del mismo, y una vez este material es depositado dentro del cilindro ya el barreno lo transporta a lo largo del cilindro.

Para el cálculo del volumen de la tolva, como se visualiza en la ecuación 4 [58], se usa el volumen de una pirámide truncada:

Ecuación 4

$$V = \frac{h}{3} \cdot (A_B + A_b + \sqrt{A_B \cdot A_b})$$

$h = 17 \text{ cm}$

$A_B = \text{área superior de la tolva} = 14.1 \text{ cm} \times 13.8 \text{ cm} = 194.58 \text{ cm}^2$

$A_b = \text{área inferior de la tolva} = 2.8 \text{ cm} \times 2.2 \text{ cm} = 6.16 \text{ cm}^2$

$V = 1333.71 \text{ cm}^3$

Es esencial saber la disposición de la tolva respecto a cuánto material puede abarcar, es decir, el peso máximo correspondiente de pellets que puede ser depositado sin que se presente un escape o desbordamiento involuntario del material hacia el exterior [59]. Para ello es necesario saber el volumen de la tolva y la densidad correspondiente del pellet, con el fin de poder establecer la capacidad de la tolva. La masa de un pellet de polipropileno se da con la siguiente ecuación:

Ecuación 5 [60].

$$\text{Masa} = \text{Densidad} * \text{Volumen}$$

$$\text{Densidad del polipropileno} = 0.0009 \text{ kg/cm}^3$$

$$V = \text{volumen} = 1333.71 \text{ cm}^3$$

Con los valores obtenidos (densidad del polipropileno y volumen de la tolva) que serán situados en la ecuación 5, se determinó que la masa o cantidad en kilogramos aproximada capaz de abarcar la tolva es:

$$\text{Masa} = 0.0009 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} * 1333.71 \text{ cm}^3$$

$$\text{Masa} = 1.2 \text{ kg}$$

La figura 17 muestra como resultado el sistema el cual suministra el material sólido y transporte, donde este ya cuenta con el barreno, cilindro y tolva.

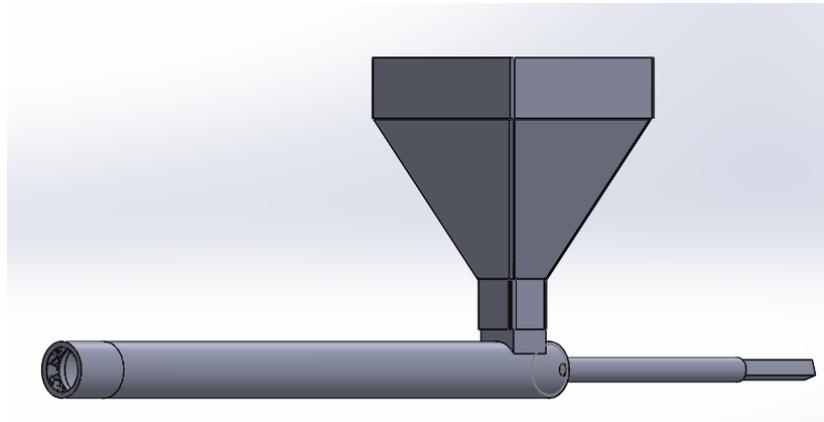


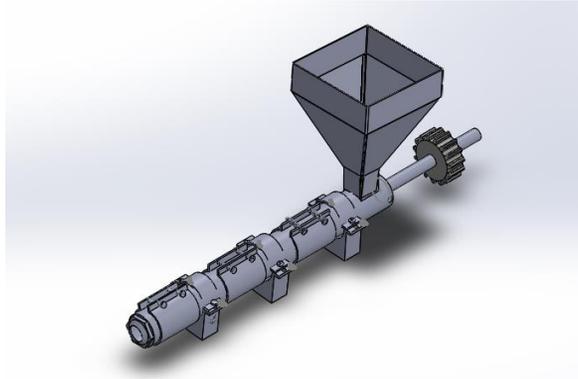
Figura 17 Diseño CAD del Cilindro, tolva y barreno. Fuente: propia.

Desde una perspectiva de funcionalidad del sistema, se ha diseñado el cilindro de manera que el husillo pueda girar sin generar fricción que pueda desgastar los componentes. Para lograr esto, se han añadido dos rodamientos que se encuentran ubicados de manera concéntrica dentro del cilindro, de tal manera que el husillo pueda flotar dentro del sistema sin sufrir daños. Estos rodamientos se han instalado antes de la estría helicoidal, en el eje que se encuentra entre la tolva y el sistema de potencia mecánica.

#### 8.4. Diseño completo del sistema de extrusión

Ya realizados los primeros diseños en SolidWorks en lo que concierne a la etapa de

extrusión, se prosigue con una prueba de ensamble con el fin de observar la veracidad de las medidas en caso de colisión entre las piezas debido a un desfase por causa de la diferencia entre el tamaño de cada una. Después de ajustes específicos en los elementos el software fue capaz de llevar a cabo el ensamble presentado en la figura 18.



*Figura 18 Sistema de extrusión CAD. Fuente: propia.*

### **8.5. Diseño de cilindro inyector**

El cilindro para el sistema de inyección tiene un diámetro interno de una pulgada, una longitud de 200 mm y tiene una capacidad de inyección de  $55,88\text{cm}^3$  de material. Para permitir el acople del cilindro extrusor, se ha soldado un perno de tornillo tipo lampara en una apertura redonda del cilindro que se ha mecanizado (cabe resaltar que este perno de tornillo tipo lampara unido al cilindro de inyección permite tanto acoplar como desacoplar el sistema de inyección del sistema de extrusión). Las medidas de esta apertura son de 15.80 mm de diámetro interno y 21.34 mm de diámetro externo. Con este diseño, se logra una integración efectiva entre el cilindro de inyección y el cilindro extrusor, asegurando un funcionamiento óptimo del sistema. Además, en el extremo de salida del material se ha realizado un mecanizado en forma de rosca, lo que posibilita la conexión de diferentes boquillas según el tipo de molde de inyección que se utilice como se puede observar en la figura 19.

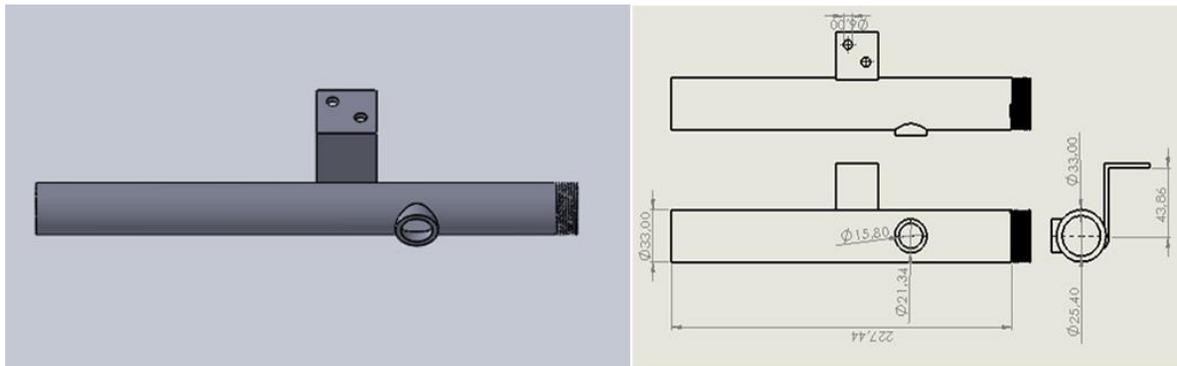


Figura 19 Diseño CAD y dibujo del cilindro, diseño del cilindro en SolidWorks. Fuente: propia.

### 8.6. Diseño del pistón

Se diseñó un pistón y su extensión (eje), el cual se sujeta a un soporte para otorgarle firmeza al eje que estará a su vez enlazado al sistema de palanca que se diseñó como se muestra en la figura 20. Este sistema en conjunto es el encargado de inyectar el materia situado en el tubo. Este pistón se realizó con acero macizo donde las medidas del pistón son de 117 mm de largo y un diámetro de 25.40 mm y la medida del eje es de 230 mm de largo y cuenta con dos diámetros a lo largo del material (la parte con mayor diámetro tiene un valor de 18.73 mm y la parte más angosta cuenta con 10 mm de diámetro).

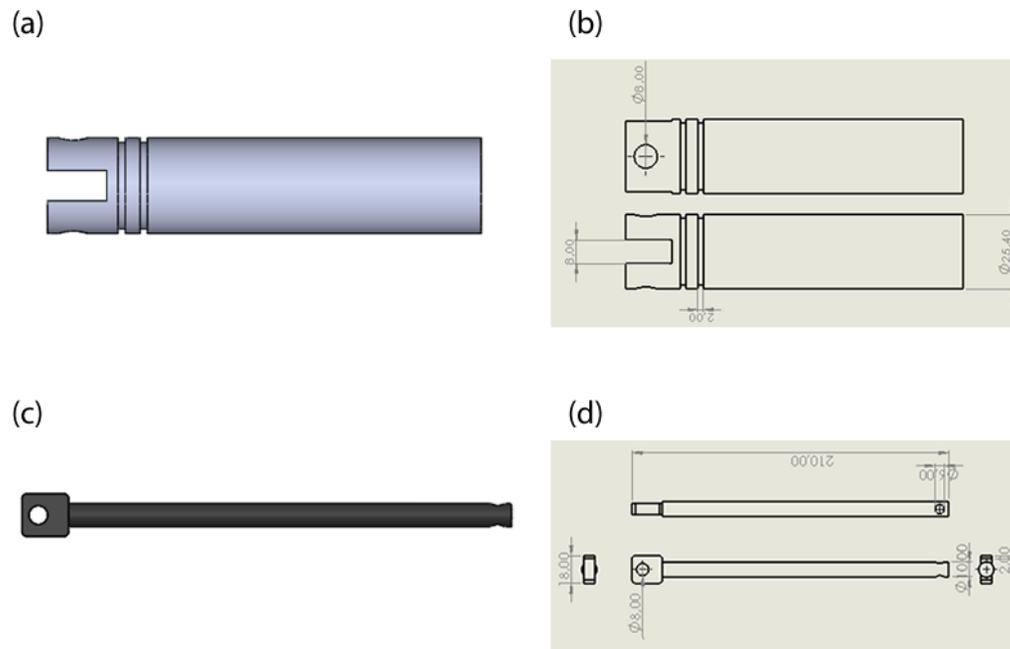


Figura 20 Diseño CAD y dibujo del pistón, diseño del pistón en SolidWorks. Fuente: propia.

## 8.7. Diseño de los elementos para los soportes del cilindro inyector

Para la sujeción del cilindro a la estructura del prototipo y a su vez la conexión con la barra diseñada para la aplicación de la fuerza que se lleva a cabo para realizar la inyección, se diseñaron diferentes piezas como se evidencia en las figuras 21, 22 (todas sus medidas están en mm).

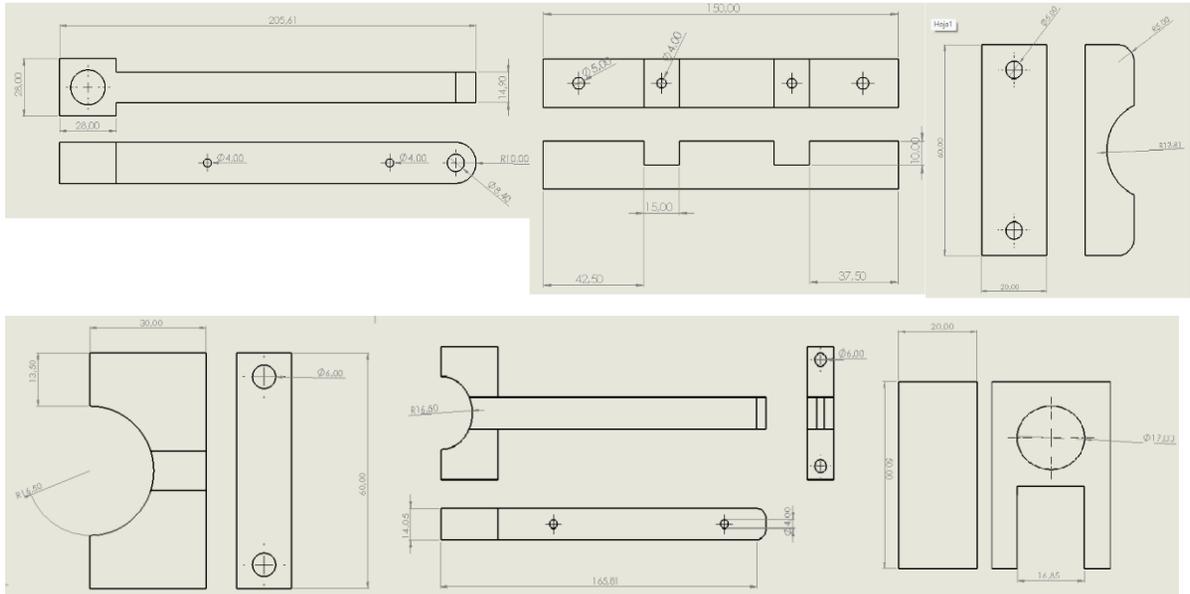
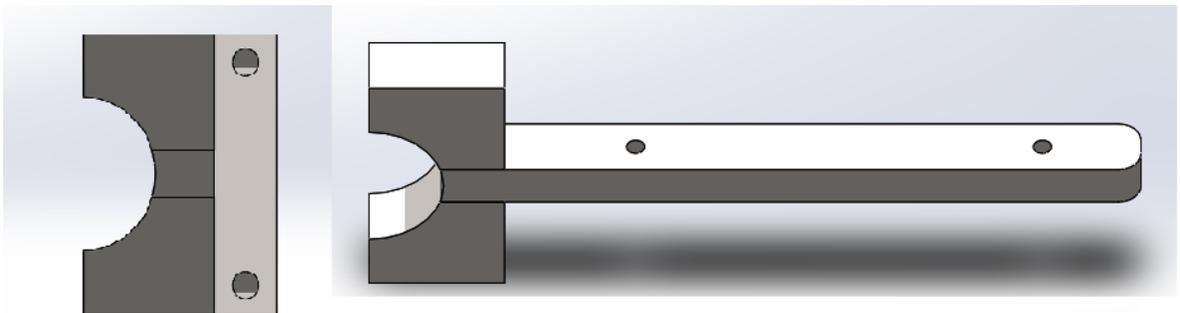


Figura 21 Dibujo CAD de piezas de sujeción, diseño de piezas de sujeción en SolidWorks. Fuente: propia.



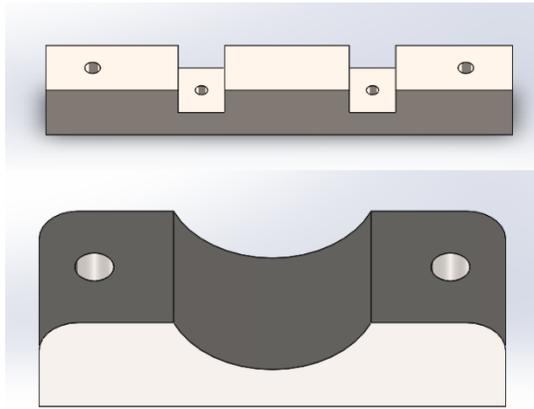


Figura 22 Diseño CAD de piezas de sujeción, diseño de piezas de sujeción en SolidWorks. Fuente: propia.

### 8.8. Diseño de la palanca

Para la inyección del material se diseñó un sistema de palanca, ya que, este sistema se podía abarcar con el presupuesto establecido del proyecto y era flexible tanto para el diseño como para ajustes a tener en cuenta en el proceso de inyección. Esta palanca se presenta en la figura 23.

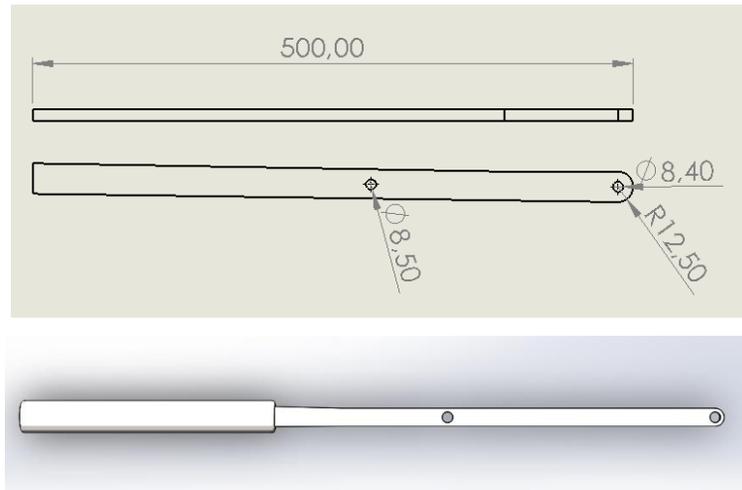


Figura 23 Diseño CAD y dibujo de la palanca, diseño de la palanca en SolidWorks. Fuente: propia.

### 8.9. Diseño de la boquilla y acople

Después de haber diseñado los subsistemas de extrusión e inyección de forma separada, se hace necesario establecer una conexión entre los cilindros para facilitar el flujo del material transportado desde el subsistema de extrusión hacia la cámara de inyección. Con este fin, se ha creado un diseño de acople con rosca tanto en el cilindro de inyección como en la salida del cilindro de extrusión. Este

acople con rosca asegura un enlace sólido y seguro entre los dos cilindros, permitiendo una transferencia eficiente y continua del material entre ambos subsistemas. Esta configuración de acople juega un papel fundamental en el funcionamiento fluido y efectivo del sistema en su conjunto, garantizando una operación precisa y confiable en el proceso de inyección como se observa en la figura 24.

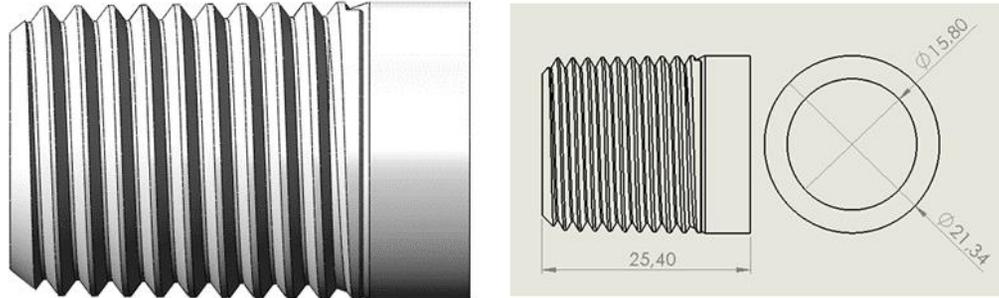


Figura 24 Diseño CAD y dibujo del acople, diseño del acople en SolidWorks. Fuente: propia.

Con el objetivo de tener un control adecuado sobre el volumen del material expulsado durante la etapa de inyección, se ha desarrollado un diseño de boquilla cónica que se puede enroscar en el cilindro inyector. Esta boquilla con forma cónica proporciona una salida precisa y constante del material, permitiendo regular de manera moderada la cantidad de material que se desea inyectar. Gracias a esta configuración, se logra mantener un flujo estable y controlado, garantizando una inyección precisa y consistente en el proceso. La boquilla cónica se convierte en un elemento clave para obtener resultados óptimos en la expulsión del material durante la inyección cómo se observa en la figura 25.

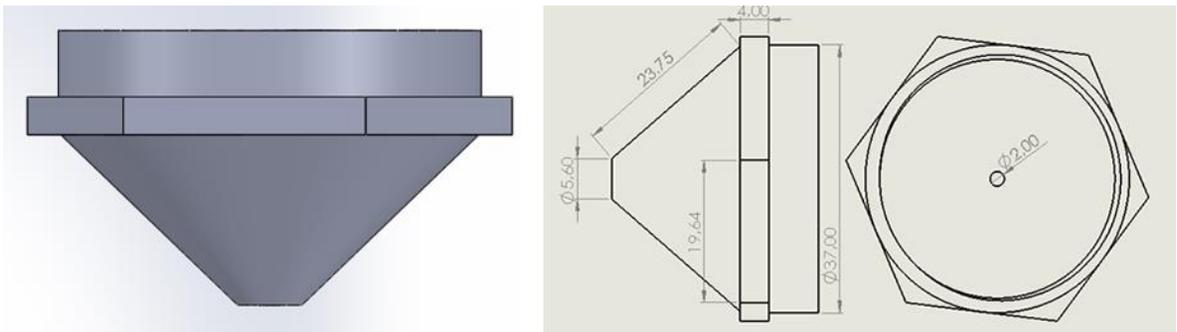
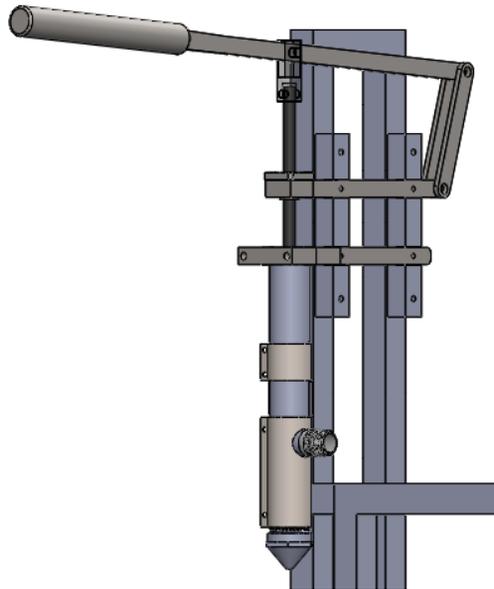


Figura 25 Dibujo CAD de la boquilla, diseño de la boquilla en SolidWorks. Fuente: propia.

### 8.10. Diseño completo del sistema de inyección

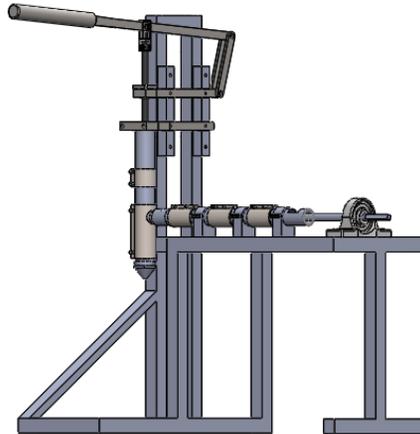
Ya realizados los primeros diseños en SolidWorks en lo que concierne a la etapa de inyección, se procede con una prueba de ensamble para verificar la precisión de las medidas en caso de que las piezas choquen debido a una disparidad en sus tamaños. Después de realizar ajustes específicos en los componentes, el software logró completar exitosamente el ensamble, mostrado en la figura 26.



*Figura 26 Sistema de inyección CAD. Fuente: propia.*

Después de completar el diseño de los dos subsistemas de extrusión e inyección de forma individual, se procede a realizar el acople de ambos y se diseña la estructura que brindará el soporte necesario al sistema completo. De esta manera, se logra obtener el diseño CAD ensamblado del sistema de inyección de dos etapas presentado, en la figura 27. La integración de los subsistemas y la estructura garantiza un funcionamiento cohesionado y eficiente del sistema en su conjunto. El diseño CAD ensamblado proporciona una representación visual completa y detallada de cómo los diferentes componentes se unen para formar un sistema coherente y funcional. Este diseño finalizado sienta las bases para la construcción y fabricación del sistema de inyección de dos etapas, brindando un enfoque integral

y bien estructurado para su implementación.



*Figura 27 CAD del Sistema de inyección de dos etapas. Fuente: propia.*

## **9. SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS MEDIANTE SOFTWARE CAE.**

Para la validación de los diseños realizados se prosiguió a realizar simulaciones térmicas y de esfuerzo mecánico. Para este fin, se utilizó el software SolidWorks como herramienta ideal para llevar a cabo las simulaciones deseadas, con el objetivo de corroborar lo mejor posible la veracidad de los materiales de cada una de las piezas involucradas en la simulación. Se inició con las simulaciones térmicas, en las cuales se establecieron diversos valores para las para cada una de estas. El objetivo principal era obtener resultados confiables y lo más realistas posibles que reflejaran con precisión el comportamiento térmico del sistema. SolidWorks proporcionó una plataforma adecuada para realizar estas simulaciones y obtener datos relevantes para el análisis y la optimización del diseño. En la figura 28, se puede observar el sistema extrusor con cargas térmicas en cada una de sus resistencias donde la resistencia del lado izquierdo se le aplicó una temperatura de 150 °C, la resistencia del centro se le aplicó una temperatura de 200 °C y por último a la resistencia del lado derecho se le aplicó una carga térmica de 250 °C. La distribución de las cargas se realizó de este modo pues el proceso de inyección necesitaría de tres etapas para proporcionar una distribución más completa de las altas temperaturas en el cilindro, las cuales son: precalentamiento, calentamiento e

inyección.

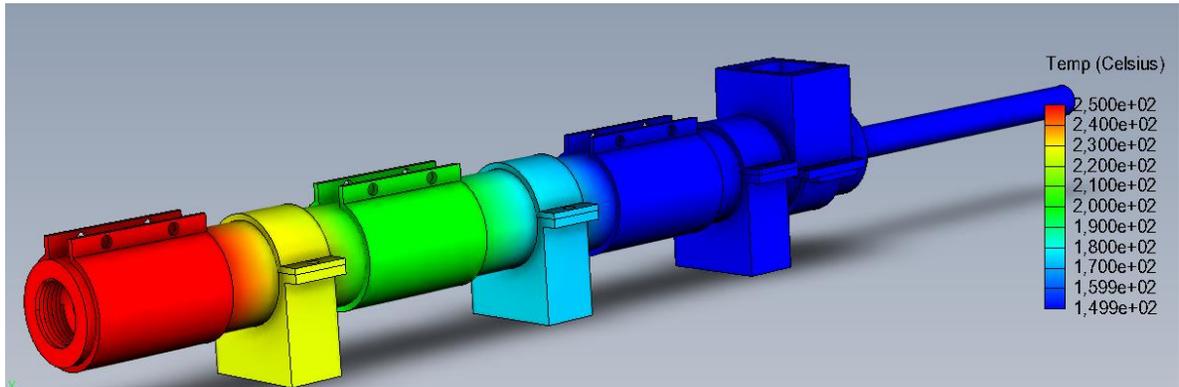


Figura 28 Simulación térmica del sistema extrusor en SolidWorks. Fuente: propia.

En los resultados arrojados por la simulación se evidencia una buena transferencia de calor por parte de las resistencias térmicas hacia el cilindro y del cilindro hacia los soportes.

El primer enfoque a tener en cuenta fue que las resistencias si pueden transferir la temperatura requerida, el material que se transportará necesitaría una temperatura muy específica (o establecida en cierto rango controlado) porque de lo contrario el material que se transporta terminaría afectado negativamente.

De igual manera, se realizó la simulación para el sistema de inyección donde se le aplicaron las cargas térmicas en cada una de sus resistencias como se puede observar en la figura 29. A la resistencia de menor tamaño le fue aplicada una temperatura de 200 °C y para la resistencia de mayor tamaño le fue aplicada una temperatura de 250 °C. Teniendo en cuenta el clima de la zona geográfica en la cual que se lleva a cabo el desarrollo de la máquina, también se aplicó una temperatura ambiente de 23 °C para que la simulación realizada aplicara lo mayor posible a las condiciones del entorno real.

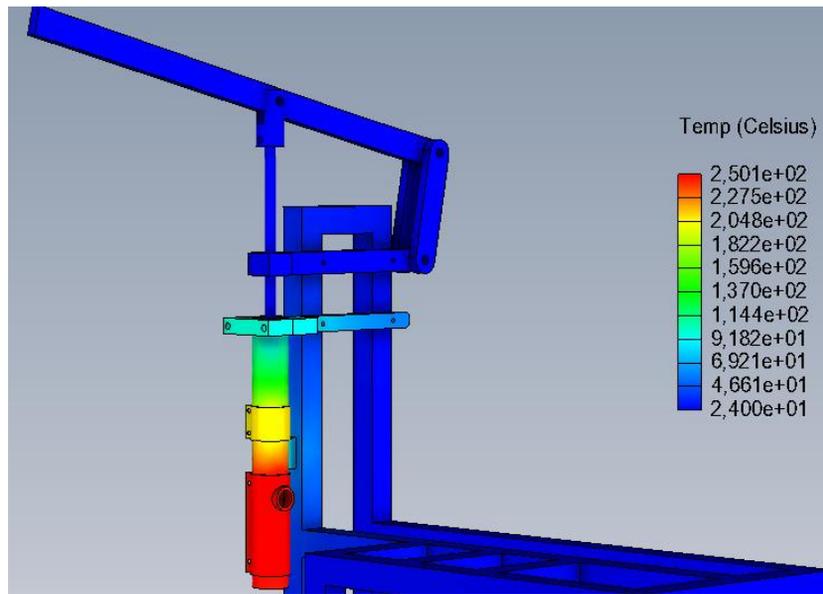


Figura 29 Simulación térmica del sistema inyección en SolidWorks. Fuente: propia.

Los resultados evidencian que existe una correcta transferencia de calor por parte de las resistencias térmicas hacia el cilindro, de manera similar, cabe destacar que la base en la que se encuentra ubicado el sistema presenta una temperatura moderada, lo cual indica que la disipación de calor desde el cilindro hacia la base es óptima.

Además, se llevó a cabo una simulación conjunta de ambos sistemas para predecir con mayor precisión la temperatura a la que se llegará en la estructura que albergará ambos sistemas. En la figura 30 también se puede observar que se les aplicó una temperatura ambiente con el fin de obtener una simulación lo más cercana posible a la realidad. Las temperaturas de las resistencias térmicas mencionadas anteriormente son necesarias para el sistema, ya que el proceso de inyección requiere de tres etapas: precalentamiento, calentamiento e inyección.

En los resultados de la simulación se pueden observar que la estructura disipa muy bien la temperatura a la que los cilindros llegan gracias a las resistencias térmicas, siendo esto un resultado adecuado.

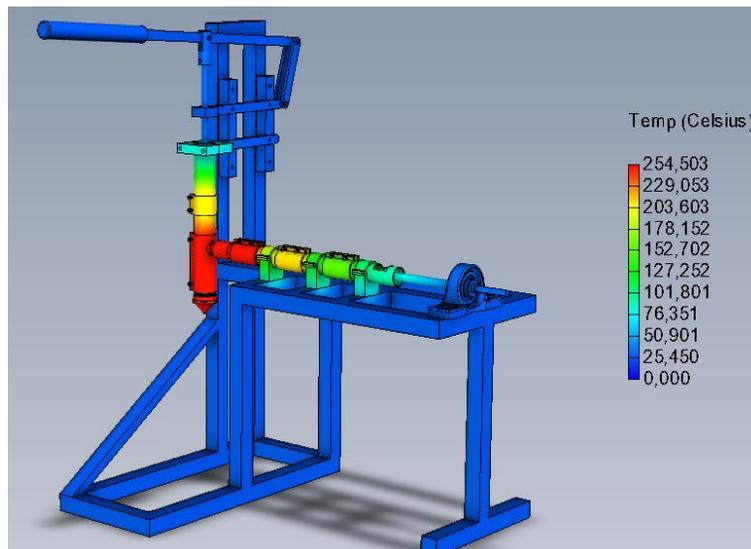


Figura 30 Simulación térmica de ambos sistemas en SolidWorks. Fuente: propia.

De la misma forma se realizó una simulación de estática en el sistema de inyección más exactamente en la palanca encargada de realizar la inyección, con el fin de observar el comportamiento de la estructura a la que esta está sujeta y la palanca en sí ver figura 31.

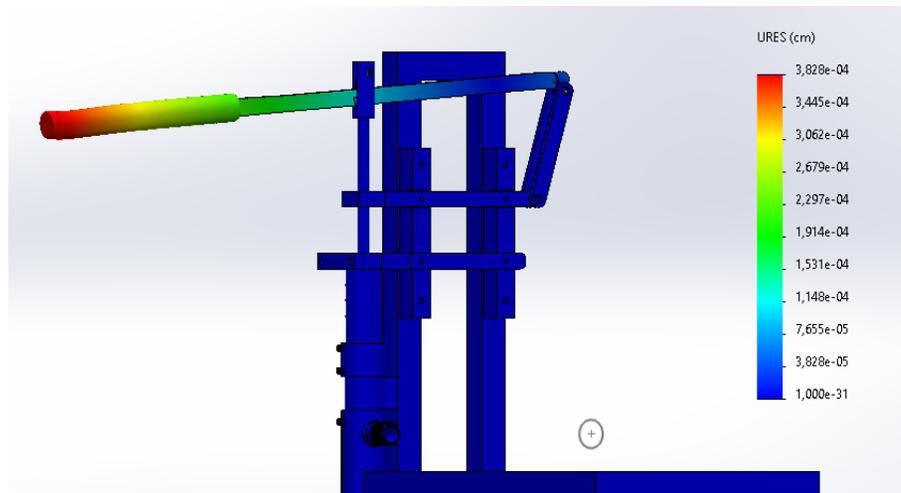


Figura 31 Simulación estática del sistema inyección en SolidWorks. Fuente: propia.

Para estimar la fuerza a ser ejercida sobre el pistón por medio de la palanca y observar cómo se comporta el sistema tras esa fuerza ejercida, se lleva a cabo una simulación de la reacción del sistema de inyección al aplicarle una fuerza específica. Esta fuerza se determinó teniendo en consideración el área del pistón ( $0.00399 \text{ m}^2$ ) y la presión de inyección máxima del HDPE (103 MPa) [61] y del PP (103 MPa) [62].

Con esto en cuenta se aplica la ecuación 6:

*Ecuación 6*

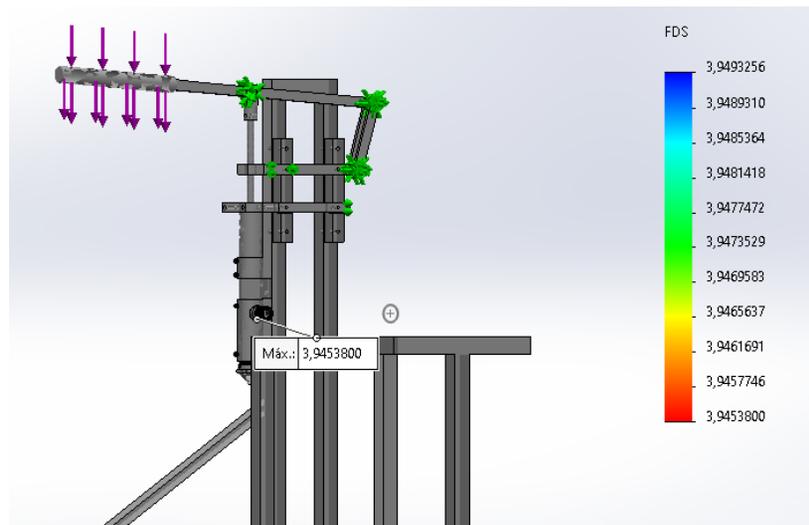
$$F = P \cdot A$$

P=Presión soportada (Pa ó N/m<sup>2</sup> )

F=fuerza aplicada

A= área donde actúa la fuerza aplicada (0.00399 m<sup>2</sup>)

Una vez aplicada la formula, se obtiene que la fuerza máxima a ejercer para HDPE es de 410970 N y la fuerza máxima a ejercer para PP es de 410970 N. La estructura de manera positiva no demuestra ningún tipo de deformación relevante al aplicar estos valores en la simulación como se puede observar en la figura 31. Por otro lado, el factor de seguridad (ver figura 32) indica que la estructura está diseñada para resistir cargas y fuerzas de manera segura, asegurando su estabilidad y protegiendo a las personas y bienes cercanos.



*Figura 32 Simulación del factor de seguridad para el PP del sistema inyección en SolidWorks. Fuente: propia.*

## **10.IMPLEMENTACION DEL SISTEMA**

Antes de tener un ensamble final de la máquina, se elaboró un prototipado rápido para evaluar el correcto funcionamiento del sistema diseñado.

### **10.1. Prototipado rápido**

Una vez recopilados todos los detalles de diseño del sistema, se procedió a la creación de un prototipo a escala reducida en un 50% utilizando tecnologías de fabricación aditiva (impresión 3D), para producir las piezas de manera rápida y precisa. Es importante destacar que este proceso de prototipado permite la detección temprana de posibles errores en el diseño y realizar ajustes antes de la fabricación final del sistema a escala real. Durante esta etapa, se evaluó la capacidad del sistema para transportar el material a través del cilindro extrusor, pasarlo al cilindro inyector y finalmente inyectarlo a través de la boquilla cónica. Este enfoque resultó útil para analizar e identificar posibles puntos débiles del sistema. Cada pieza impresa en 3d fue elaborada con un minucioso análisis de las medidas en la búsqueda de un correcto encaje entre cada parte una vez ya fabricadas, lo que llevó a un resultado positivo, como se observa en la figura 33.

Para realizar una prueba de funcionamiento se utilizó un material liquido-viscoso, tal como, el gel antibacterial, ya que, se tuvo en cuenta que el estado del plástico al someter a los procesos de extrusión e inyección es viscoso debido a las altas temperaturas a las que estará sometido. Al introducir el gel en la tolva, éste pudo ser desplazado a través del cilindro extrusor e inyectado una vez entrara a la etapa de inyección, por lo cual se pudo evidenciar el correcto funcionamiento respecto al transporte de material en ambos procesos.



*Figura 33 Prototipo de inyección de dos etapas impresos en 3d, escalados en  $\frac{1}{2}$  del tamaño real. Fuente: propia.*

## **10.2. Diseño y fabricación a escala real del prototipo**

Con los diseños y pruebas realizadas se prosigue con la fabricación a escala real del prototipo, por lo cual en primera instancia se opta por la estructura del prototipo encargada de sostener los elementos que conformarán los procesos de extrusión e inyección. Al tener en cuenta el tipo de procesos que se llevarán a cabo, se realizó la adquisición de dos tubos cuadrado de 1 pulgada calibre 16 y de 6 metros de largo. Esto se consideró luego de analizar su flexibilidad el desempeño del material al soldar.

La figura 34 muestra la estructura soldada.



*Figura 34 Estructura a escala real. Fuente: propia.*

Con la estructura a escala real lista, los cilindros de los procesos se ubican en sus posiciones definidas en las simulaciones. Para adaptarlos a los requerimientos específicos de cada proceso, se realizó un trabajo mecánico en estos, para adaptar la tolva y la balinera. Estos ajustes se muestran en la figura 35.



*Figura 35 Mecanizado de los cilindros. Fuente: propia.*

Para lograr un acoplamiento efectivo entre los procesos de extrusión e inyección, se diseñó un acople personalizado compuesto por un perno de tornillo tipo lámpara y una tuerca cilíndrica. Ambas piezas se crearon para conectar los cilindros de manera óptima, permitiendo el paso del material. La soldadura se utilizó para fijar el perno al cilindro inyector y la tuerca cilíndrica al cilindro extrusor, como se muestra

en las figuras 36 y 37. Este acople garantiza la dependencia entre los procesos y asegura el flujo eficiente del material.



*Figura 36 Cilindro de extrusión e inyección mecanizados. Fuente: propia*



*Figura 37 Acoplamiento de los cilindros de los procesos de extrusión en inyección. Fuente: propia.*

Como se ha mencionado anteriormente, gracias a la adquisición del barreno se establecieron medidas estándar para poder obtener a medida el cilindro de la etapa de extrusión y en base a este cilindro se establecieron las dimensiones del cilindro inyector, para que existiera cierta simetría entre las etapas de proceso respecto a la cantidad de material que se extruye y luego se inyecta.

Se analizó que, para llevar a cabo un adecuado proceso de extrusión, es necesario que el barreno, el cual se encargará de transportar el material a través del cilindro extrusor, se encuentre lo más centrado posible dentro del cilindro. Con esto se determinó que sería pertinente fijar una balinera al comienzo del cilindro, que tuviera un diámetro externo lo suficientemente simétrico al diámetro interno de este cilindro y que el diámetro interno de la balinera fuera acorde al diámetro del eje del barrero. Al obtener la balinera con las características más acordes, se llevó a cabo un trabajo con torno para desbastar de forma milimétrica la capa interna al inicio del cilindro,

para poder acoplar la balinera. Esto tuvo un resultado positivo encajando la balinera con la parte desbastada del cilindro por el torno y permitiendo centralizar y mantener el libre movimiento rotativo del barreno, como se presenta en la figura 38.



*Figura 38 Encaje simétrico de la balinera con el cilindro de extrusión y el barreno. Fuente: propia.*

Al tener presente la unión del cilindro inyector con el extrusor, se analizó que el cilindro extrusor debía estar a cierta altura en su posición correspondiente en la estructura. Además, que una vez el sistema esté en funcionamiento habrá vibraciones y movimientos por parte del motor, por lo que se efectuó la fabricación de unos soportes personalizados con el fin de sujetar el cilindro a la estructura y darle una mayor firmeza. Estos soportes se encargan de fijar la parte extrusora a la estructura y uno de estos tiene una entrada un poco más cuadrada que el resto (con el fin de fijar la tolva en esta cavidad cuadrada), lo que permite de mejor manera la unión entre la boquilla de la tolva y la entrada torneada de la misma en el cilindro (ver figura 39).



*Figura 39 Soportes que fijan la etapa de extrusión a la estructura. Fuente: propia.*

Siendo proporcional a los tamaños de las partes que componen la máquina y el volumen de material capaz de abarcar el cilindro de la etapa de extrusión, se elaboró una tolva con las especificaciones ya mencionadas en la sección de diseño. Además, esta se diseñó para poder acoplarse y desacoplarse de manera modular al cilindro extrusor. Esto fue posible gracias al soporte fabricado, que asegura la firmeza y posiciona la apertura de la tolva con la boquilla del cilindro. De esta manera, se logra un flujo eficaz de material de la tolva al cilindro. Esta tolva se puede evidenciar en la figura 40.



*Figura 40 Tolva fabricada a medida. Fuente: propia.*

Con la fabricación de los soportes y la tolva, se realizó el acoplamiento de cada uno, mientras se observaban cómo cada uno cumple con su función correspondiente y con ello se dio la incorporación definitiva de la etapa extrusora de la máquina en la estructura (ver figura 41).



*Figura 41 Montaje de los soportes y la tolva al cilindro extrusor. Fuente: propia.*

A partir del cilindro de inyección evidenciado en la figura 37, se lleva a cabo la fabricación del pistón, el cual se consideró adecuado estructuralmente para empujar el material dentro del cilindro de inyección. Después de someter el cilindro compacto a trabajos mecánicos, se adapta a la cavidad hueca del cilindro de inyección y permite un manejo flexible para realizar movimientos linealmente verticales. Esto le permite transportar el material extruido hasta la boquilla de salida en el proceso de inyección. Se puede evidenciar este pistón fabricado en la figura 42.



*Figura 42 Pistón del sistema de inyección. Fuente: propia.*

Con la fabricación del pistón, se observó que este es capaz de inyectar la cantidad de material necesario que abarca en su totalidad el cilindro de inyección y también el molde de la probeta (esta por medio del software CAD se calculó que su volumen es de  $6.96 \text{ cm}^3$ ), para ello se realizaron cálculos que corroboran el flujo de material a inyectar de la siguiente manera:

El volumen del barreno, calculado en SolidWorks, es de aproximadamente  $63.11 \text{ cm}^3$ , mientras que el volumen del cilindro de extrusión es de aproximadamente  $36.36 \text{ cm}^3$ . Se determinó que la tolva debe abarcar al menos  $26.75 \text{ cm}^3$  para permitir el flujo de material entre el cilindro y el tornillo. Esta cifra se obtiene restando los volúmenes del tornillo y el cilindro al espacio volumétrico total de la tolva.

Con el volumen mínimo de la tolva calculado y el volumen del molde de la probeta, existe un punto de referencia respecto a la cantidad de volumen que se debe inyectar. Para determinar el volumen capaz de inyectar se fijó el pistón a la máxima altura capaz de alcanzar cuando este se desplaza verticalmente hacia arriba dentro

del cilindro de inyección y se calculó el volumen del espacio restante del cilindro que no ocupa el pistón de la siguiente manera (ecuación 7):

Diámetro cilindro inyección =  $D = 2.73 \text{ cm}$

Distancia del espacio libre hasta el pistón =  $h = 9.51 \text{ cm}$

Volumen capaz de inyectar o volumen de flujo =  $V_f$

*Ecuación 7*

$$V_f = \pi r^2 \cdot h$$
$$V_f = 55.66 \text{ cm}^3$$

Con el ultimo resultado de la ecuación 6 se determinó de que el pistón es capaz de abarcar y superar la cantidad volumétrica requerida en primera instancia de material a inyectar para poder generar adecuadamente el molde de la probeta.

Con el ingreso del pistón al sistema de inyección, se fabrica la palanca, como elemento para aportar la movilidad vertical al pistón, siguiendo los parámetros de diseño previos. La palanca se ubica debido a la acción que debe realizar justo arriba del sistema de inyección, de esta forma se favorece el movimiento vertical del eje del pistón, como se presenta en la figura 43.



*Figura 43 Palanca del sistema de inyección. Fuente: propia.*

Teniendo en cuenta la posición vertical (perpendicular al sistema de extrusión) en la que se encuentra el sistema de inyección, es necesario tener uniones y soportes que permitan enlazar y fijar las partes que componen este sistema entre sí. Por lo cual se fabrican soportes que sujeten el eje del pistón a la palanca y a su vez estos soportes los fijan a la estructura en sí, para permitir un movimiento centrado siendo también concéntrico como se evidencia en la figura 44.



*Figura 44 Soportes del cilindro de inyección. Fuente: propia.*

Se diseñó y fabricó una boquilla especial para acoplarse al cilindro de inyección, con el propósito de lograr una salida de material de 5 milímetros de diámetro. La selección de este tamaño se fundamentó en la necesidad de mantener un control adecuado del tamaño volumétrico del material expulsado, evitando que esto afecte la presión ejercida por el pistón en el proceso de inyección.

El diseño de la boquilla se realizó cuidadosamente, teniendo en cuenta diversos factores. En primer lugar, se buscaba que la salida del material se diera en forma de filamento, siguiendo los estándares comúnmente utilizados en la industria de impresoras 3D para generar filamentos, donde los diámetros típicos oscilan entre 1.75 y 3 milímetros [63].

Además, se consideró la eficiencia del proceso, específicamente en términos de la cantidad de material que se podía producir por unidad de tiempo. Si bien el tamaño de las probetas a fabricar no era muy grande, se tenía el objetivo de acelerar la producción sin comprometer la cantidad de material necesario para cada probeta. Por lo tanto, la elección de una boquilla con un diámetro de 5 milímetros permitiría alcanzar una mayor velocidad de producción sin crear obstáculos por la cantidad de material que debía salir en cada ciclo de inyección.

En la figura 45 se puede observar el resultado de esta boquilla en acción, donde se aprecia cómo el material se expulsa en forma de un filamento de 5 milímetros de

diámetro con precisión y fluidez. El diseño y fabricación de esta boquilla personalizada demostró ser una solución eficiente para asegurar un proceso de inyección controlado y optimizado, lo que contribuyó significativamente al éxito general del sistema de inyección de dos etapas.



*Figura 45 Boquilla de 5 milímetros del sistema de inyección. Fuente: propia.*

Con todos los elementos que componen a la máquina prototipo fabricados, se procede con la integración de cada pieza. Lo que resulta en una máquina robusta que cumple con las características físicas otorgadas a través del ensamble llevado a cabo en el diseño CAD y su prototipado rápido observado en la figura 33, para que ésta realice correctamente su función al establecer un control de temperatura y comience a realizar movimientos mecánicos por medio del motor designado a llevar el sistema. Esta máquina se estableció de tal manera que tenga el potencial para mejorar según las necesidades futuras que puedan surgir respecto a los sistemas de extrusión e inyección. En primera instancia, la primera culminación de la máquina prototipo se puede evidenciar en la figura 46.



*Figura 46 Maquina prototipo con los sistemas de extrusión e inyección establecidos. Fuente: propia.*

Uno de los elementos fundamentales para el funcionamiento de la maquina es el motorreductor encargado de otorgar el movimiento de giro mecánico al barreno que realiza el transporte y extrusión del material, por lo cual, este debe ser capaz de adaptarse al entorno de la máquina para poder llevar a cabo su función. Para esto se cuenta con un motor Sinfín corona trifásico (220 voltios) de 1 HP, de 1800 RPM con una caja reductora NMRV-P 063 REL 40:1.

Con lo anterior mencionado, se diseñó una estructura que permite la movilidad del motorreductor para ajustarse y lograr una relación de movimiento adecuada entre el eje del motor y el del barreno.

Esta estructura realizará respectivamente su función en la parte de otorgar cierto rango de movimiento al motorreductor gracias a unos tornillos y bisagras que se encargarán tanto de poder subir como de bajar la plataforma donde se encuentra y en la parte horizontal gracias a cierto rango de espacio (el cual se puede evidenciar en las dos ranuras visualizadas a lo largo de la plataforma) establecido por medio de una broca que le permitirá moverse hacia los lados. Esta estructura se puede evidenciar en la figura 47.

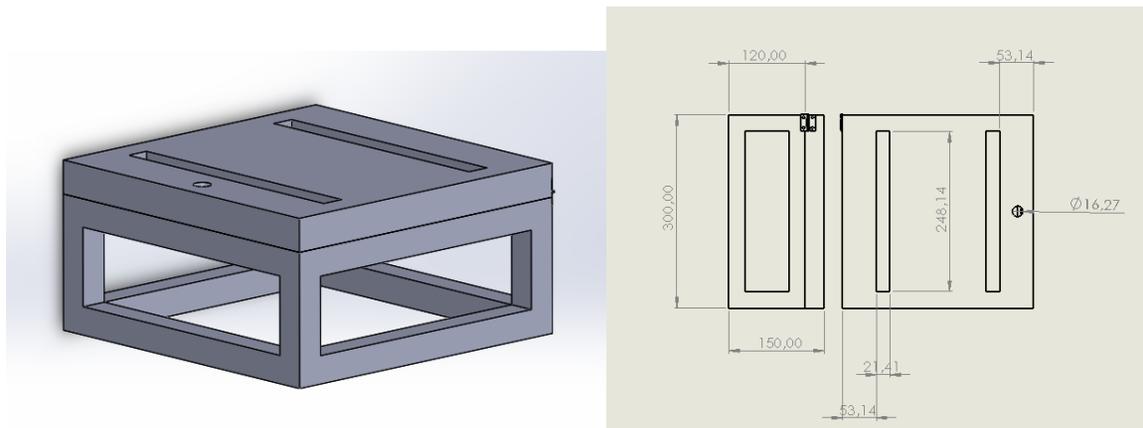


Figura 47 Diseño CAD y dibujo de la base del motor SolidWorks. Fuente: propia.

Esta estructura, con bisagras colocadas para el movimiento de la plataforma, permite pequeños desplazamientos verticales y horizontales. Esto garantiza una sincronización precisa del elemento que conecta los ejes para tensar y centrar una cadena, evitando desajustes involuntarios en la relación de transmisión entre los piñones regidos por la cadena. La estructura de soporte del motor implementada se puede apreciar en la figura 48.

Para llevar a cabo esta relación de transmisión entre engranajes, se tiene en cuenta que la ecuación para regir este tipo de movimientos es [64]:

Ecuación 8

$$\frac{N1}{N2} = \frac{D2}{D1}$$

N1= Velocidad del giro del piñón motriz

N2= Velocidad del giro del piñón conducido

D1= Número de dientes del piñón motriz

D2= Número de dientes del piñón conducido

Se conoce que ambos piñones usados en la relación de transmisión tienen el mismo número de dientes (14) y tamaño (diámetro de 6 cm), por lo cual se concluye que la velocidad aplicada en un piñón será la misma que tendrá el otro.

Cabe destacar que el sistema para la transmisión de velocidad implementado permite cambiar los engranajes y con ello el tipo de transmisión que se esté

ejecutando según la velocidad aplicada, es decir, modificar la velocidad de giro. Al poseer el motor una capacidad de 1800 rpm la caja reductora (con relación 40:1) de este minimizará el valor a 45 rpm, el cual, es un valor ubicado en el rango relevante para los rpm usados en los procesos de extrusión (dependiendo de la temperatura usada) según lo investigado en el estado del arte.



*Figura 48 Posición del motor y conexión hacia el husillo. Fuente: Propia.*

Es esencial considerar que la estructura diseñada debe ser capaz de soportar el peso del motorreductor. Por lo tanto, se realizó una simulación aplicando una fuerza sobre la estructura para evaluar su comportamiento ante posibles deformaciones debido al peso del motor. La fuerza ejercida fue de 225.4 N, obtenida al multiplicar el peso del motorreductor (23 kg) por la gravedad ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ). Los resultados de la simulación fueron positivos, demostrando que la estructura no sufrió ninguna afectación negativa o deformación, como se puede observar en la figura 50. De esta forma se puede observar que se tiene un factor de seguridad adecuado en la figura 49.

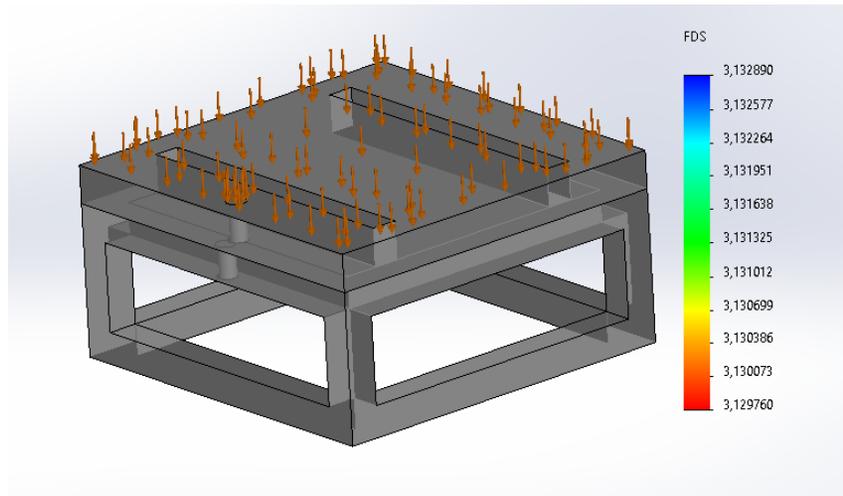


Figura 49 Simulación del factor de seguridad de la base del motor. Fuente: propia.

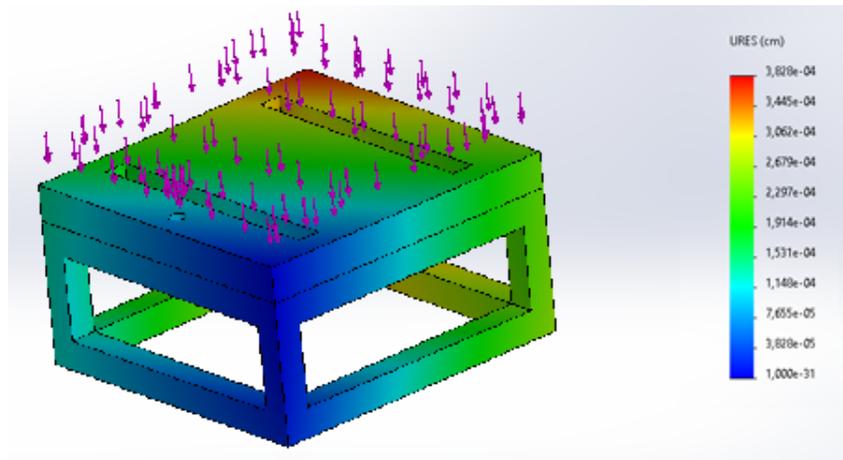


Figura 50 Simulación del desplazamiento de la base del motor. Fuente: propia.

La figura 51, muestra el sistema integrado junto con el motorreductor, dando por terminada la parte estructural y de movimiento del prototipo.

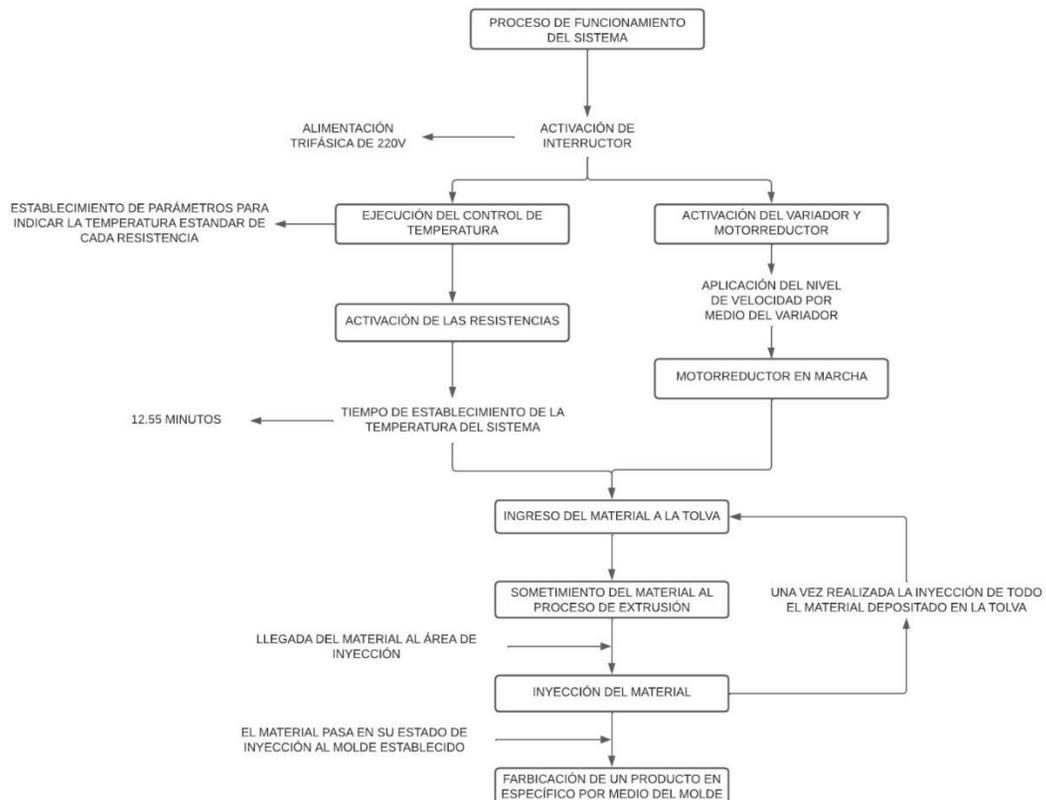


*Figura 51 Maquina prototipo finalizada. Fuente: propia.*

Con el primer objetivo del proyecto cumplido respecto a la fabricación del prototipo, se proseguirá con el establecimiento de control para los parámetros a los que debe estar la máquina para un correcto funcionamiento al momento de producir resultados, ya que, este control a desarrollar consiste en producir las condiciones adecuadas para el procesamiento del plástico reciclado, buscando el camino más pertinente según la manera en la cual opere la máquina al ser activada.

## 11. INSTAURACIÓN DEL HARDWARE Y SOFTWARE DEL SISTEMA PARA ESTABLECIMIENTO DE PARAMETROS

Uno de los puntos más relevantes al llevar a cabo actividades manufactureras relacionadas con la extrusión e inyección es referente a la modalidad que se establecerá para realizar un control de temperatura y velocidad, ya que, son las variables que rigen este tipo de sistemas. Con el propósito de establecer las condiciones adecuadas del sistema y lograr el correcto procesamiento del polietileno reciclado, que es el segundo objetivo de este proyecto, se hace necesario implementar tanto un control de temperatura como un control de velocidad. Independientemente del método que se utilice para este control, éste debe ajustarse a las necesidades de la máquina prototipo durante su funcionamiento para permitir la obtención de resultados referentes al material inyectado después de haber pasado por los procesos de extrusión e inyección. El funcionamiento del sistema de manera general se puede evidenciar en la figura 52.



*Figura 52 Diagrama de funcionamiento del sistema*

### **11.1. Control**

En este apartado se explica el procedimiento para combinar los elementos electrónicos de la extrusora y configurar su programación.

Para este fin se utilizó Proteus como un entorno de simulación que brinda facilidad para simular el menú de usuario programado en Arduino. Proteus permite emular el comportamiento del programa en una interfaz gráfica amigable, lo cual resulta beneficioso para el desarrollo y prueba del sistema antes de la implementación física.

El entorno de programación elegido fue el IDE de Arduino (como se mencionó en la metodología), el cual, se basa en el lenguaje de programación C++. Asimismo, el IDE de Arduino se utiliza como una herramienta de comunicación, permitiendo establecer una conexión efectiva entre los diferentes módulos y cargar el código desarrollado en la placa Arduino. Esto simplifica el proceso de programación y asegura una transferencia eficiente de instrucciones y datos entre los componentes. En cuanto a los componentes de control y potencia, se emplea CadeSimu (como se resaltó en la metodología) como una valiosa herramienta de diseño y simulación. Esta herramienta resulta especialmente adecuada para visualizar la interconexión de los componentes de control y potencia que requieren un voltaje de 120 VAC. Además, esta herramienta de simulación brinda la posibilidad de simular el comportamiento de los componentes en diferentes condiciones, lo cual resulta invaluable para identificar posibles problemas o conflictos en el diseño. De esta manera, se puede realizar una evaluación exhaustiva de la configuración y realizar los ajustes necesarios antes de llevar a cabo la implementación real.

### **11.2. Variador de frecuencia**

Se ha resaltado que además de la temperatura, otra variable fundamental para el funcionamiento del sistema es la velocidad (específicamente la velocidad de extrusión), para la cual se determinó que la manera más práctica y flexible para ejercer un control de velocidad sobre el motorreductor sería por medio de un variador, en este caso se trabajó con un variador Schneider Electric Altivar 61 cómo se puede evidenciar en la figura 53.



Figura 53 Schneider Electric Altivar 61.

Se tomó en cuenta esta marca y modelo debido a su flexibilidad de uso, ya que, su interfaz permite una interacción menos compleja con el usuario al momento de programar la velocidad con este tipo de variador. Éste al ser de 1 HP para motor trifásico de 220 v cumple con los requerimientos para controlar la velocidad del motorreductor adquirido, el cual trabaja con 1800 rpm. Aunque la reducción establezca la velocidad en 45 rpm, el variador permite un mayor rango de control (resaltando que entre 10 y los 45 rpm habrán valores clave que optimicen el proceso según el tipo de material plástico a extruir) para una mejor precisión del valor rpm que se requiera para obtener los resultados que se desean, resaltando el hecho que este permite cambiar el sentido del giro, lo que es esencial, ampliando la selección de los tipos de barreno que se pueden adquirir para el proceso sin importar como se ubican sus hélices para transportar material hacia adelante o atrás.

### 11.3. Diseño del controlador de temperatura

Es relevante destacar que el circuito de programación estará equipado con cuatro controles de temperatura. Esto se debe a que el sistema de inyección incluye 2 resistencias térmicas conectadas en serie, lo que requiere un solo control para ambas. Por otro lado, el sistema de extrusor cuenta con 3 resistencias, una para cada etapa del proceso de extrusión: precalentamiento, calentamiento e inyección.

Estas resistencias son esenciales para garantizar un adecuado control de la temperatura durante cada etapa del proceso. Como elemento esencial para el control, se utilizará un módulo relé de 4 canales. Estos relés desempeñan un papel clave en el sistema, controlando el flujo eléctrico hacia las resistencias térmicas. Al aplicar el control de temperatura, los relés actúan en respuesta a las órdenes enviadas por el Arduino una vez que las resistencias alcanzan la temperatura estimada. Cuando las resistencias alcanzan el valor predefinido, los relés interrumpen el flujo de corriente, y cuando la temperatura desciende por debajo del límite, permiten nuevamente el paso de corriente. Las resistencias térmicas, alimentadas con un voltaje de 220 AC, son controladas por un módulo de relé con 4 canales, cuyo relé se alimenta con 5 voltios DC. La señal del Arduino Mega permite controlar el flujo eléctrico de las resistencias térmicas y, en consecuencia, regular sus temperaturas. Para una mejor comprensión de este proceso, se ha diseñado un diagrama utilizando el software CadeSimu, el cual se muestra en la figura 54.

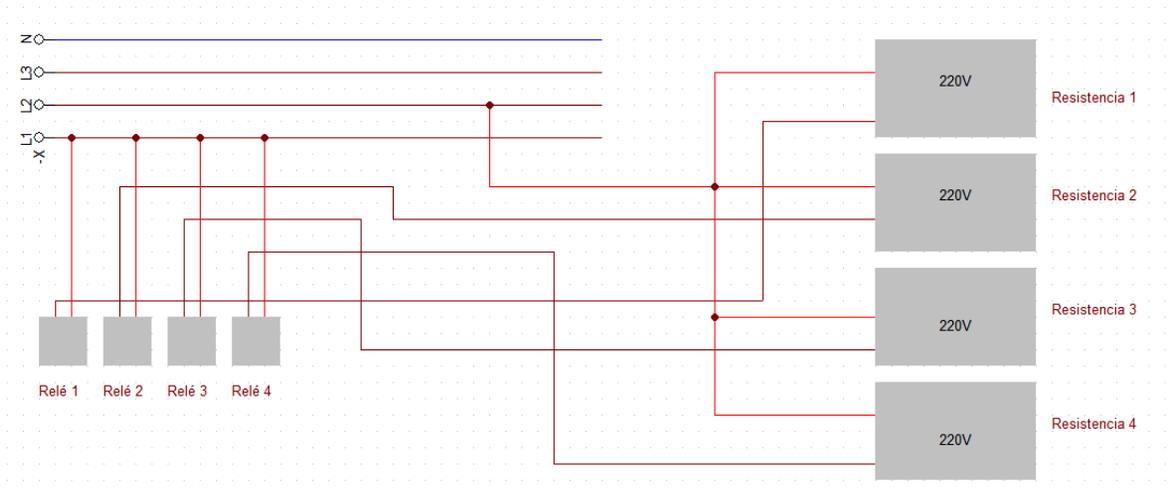
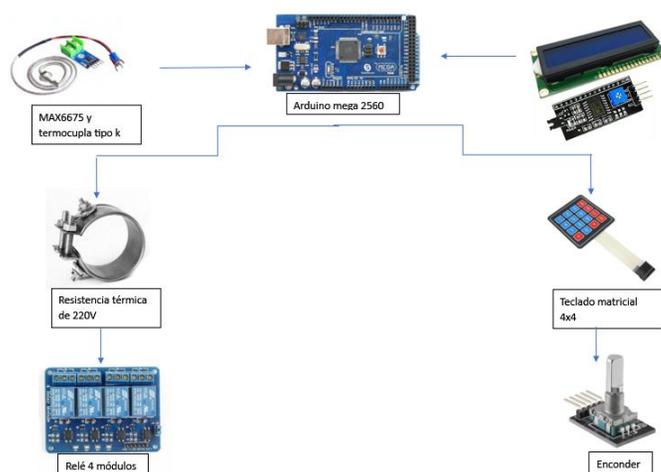


Figura 54 Esquema eléctrico de las resistencias y relé. Fuente: propia.

A continuación, se describen de forma gráfica los componentes del sistema del control (ver figura 55), el cual consta básicamente de resistencias térmicas, Arduino Mega 2560, termocupla tipo k, módulo relé 4 canales, LCD 20x4 con su módulo i2c, teclado matricial y enconder rotativo.



*Figura 55 Componentes de control. Fuente propia.*

Se optó por utilizar un Arduino Mega debido a su fácil instalación como placa de programación. El objetivo del Arduino Mega es leer los valores de temperatura provenientes de termocuplas tipo K. Esto se logra mediante el uso del módulo MAX6675, que convierte la señal analógica de las termocuplas a una señal digital con una resolución de 12 bits. El rango de lectura de temperatura abarca desde 0°C hasta 1023°C.

Para visualizar y operar los valores de temperatura, se programa una pantalla LCD en conjunto con un módulo I2C. Esta configuración permite mostrar los datos de temperatura de forma legible y también proporciona la capacidad de interactuar con el sistema para realizar ajustes o realizar acciones específicas en función de la temperatura detectada.

Los actuadores utilizados en el sistema son resistencias eléctricas con una tensión nominal de 5 VDC y 220VAC. Para activar las resistencias que operan a 220VAC, se emplea un módulo de relés de 4 canales. Estos dispositivos cumplen la función de etapa de potencia al permitir la conmutación de alta potencia necesaria para controlar las resistencias conectadas a la red eléctrica de 220VAC.

La adquisición de la señal de temperatura en la plataforma IDE de Arduino se realiza mediante el uso de la librería MAX6675. Esta librería se ajusta y configura para poder utilizar las termocuplas de manera adecuada y precisa, ya que, por medio del componente conocido como módulo MAX6675 se convierte la señal analógica de la

temperatura en una señal digital capaz de leerla el Arduino Mega y en base a los datos enviado a este ejecutar cierta medida o control sobre la resistencia censada. A continuación, en el cuadro de código se presenta el segmento utilizado para los módulos MAX6675 que obtendrán los datos de temperatura de las resistencias.

#### **Código para el módulo MAX6675:**

```
#include<max6675.h>
//PINES DE LA TERMOCUPLA 1 PRIMERA DEL LADO DERECHO

const int CSK = 36;
const int CS = 34;
const int SO = 32;
MAX6675 thermocouple (CSK, CS, SO);

//PINES DE LA TERMOCUPLA 2 LA QUE SE ENCUENTRA EN LA
MITAD

const int CSK1 = 42;
const int CS1 = 40;
const int SO1 = 38;
MAX6675 thermocouple1(CSK1, CS1, SO1);

//PINES DE LA TERMOCUPLA 3 LADO IZQUIERDO

const int CSK2 = 48;
const int CS2 = 46;
const int SO2 = 44;
MAX6675 thermocouple2(CSK2, CS2, SO2);

//////////PINES DE LA TERMOCUPLA 4 CABEZAL//////////

const int CSK3 = 51;
const int CS3 = 52;
const int SO3 = 50;
MAX6675 thermocouple3(CSK3, CS3, SO3);

temperature = thermocouple.readCelsius();
temperature1 = thermocouple1.readCelsius();
temperature2 = thermocouple2.readCelsius();
temperature3 = thermocouple3.readCelsius();
```

Como se puede observar, se realiza las declaraciones de todas las variables que son usadas para cada una de las cuatro termocuplas.

De la misma forma, el control utilizado para los sistemas es ON/OFF, del cual, gracias a los relés este se considera para esta máquina un control eficaz, esto se resalta por el hecho de que es utilizado mucho en la industria como en contenedores

refrigerantes que manejan temperaturas específicas como lo son en usos médicos para almacenamiento de muestra u otros elementos que requieren permanecer a cierta temperatura para conserva su contenido.

Por lo anterior mencionado, se optó por este tipo control, a continuación, en la figura 56 se observa todo el esquemático eléctrico utilizado para ejecutar el control de temperatura.

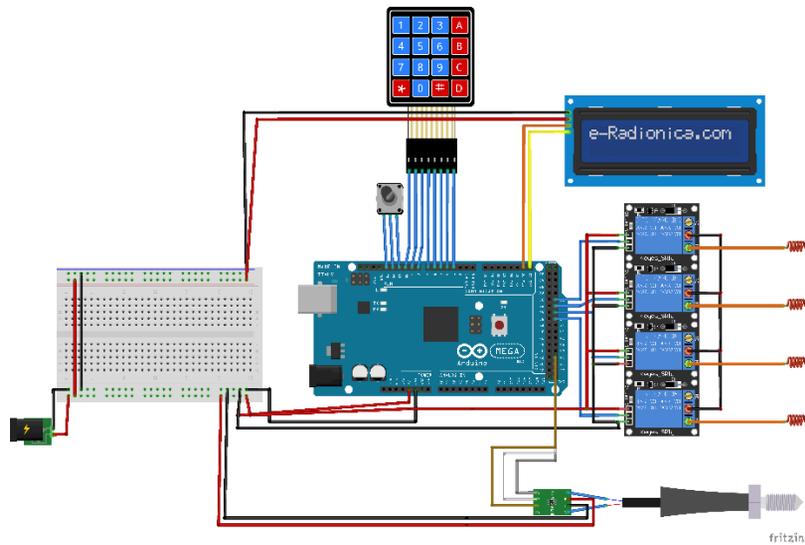


Figura 56 Esquemático eléctrico de todos los componentes usados para la realización del control. Fuente: propia.

Con la culminación del montaje de las etapas de inyección, extrusión y los circuitos a integrar para su funcionamiento definidos en la maquina prototipo realizada, se procede con el diseño y fabricación de una estructura que cumpla con las condiciones adecuadas para aplicar como panel de control. Para su diseño, es necesario tener en cuenta los espacios de los componentes que integran el sistema de control.

La realización de este panel se puede evidenciar en la figura 57.



*Figura 57 Panel del control del prototipo. Fuente: propia.*

#### **11.4. Análisis del control**

Con la primera adquisición de datos de las temperaturas generadas por las resistencias con un tiempo de muestreo de 1 segundo, se obtuvo una respuesta adecuada y sin control alguno como se esperaba. Esto se llevó a cabo con el fin de poder procesar estos datos de las temperaturas por medio del software Matlab y poder observar los tipos de repuesta, el comportamiento de la onda visualizada de manera gráfica y con ello la eficacia con la que puede actuar el sistema. Este proceso se puede observar en la figura 58.

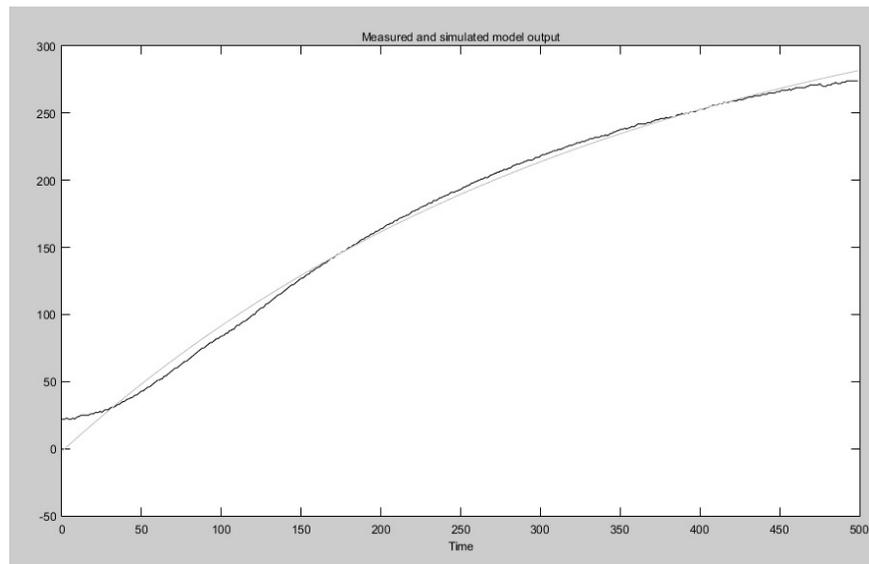


Figura 58 Respuesta de la planta de temperatura. Fuente: propia.

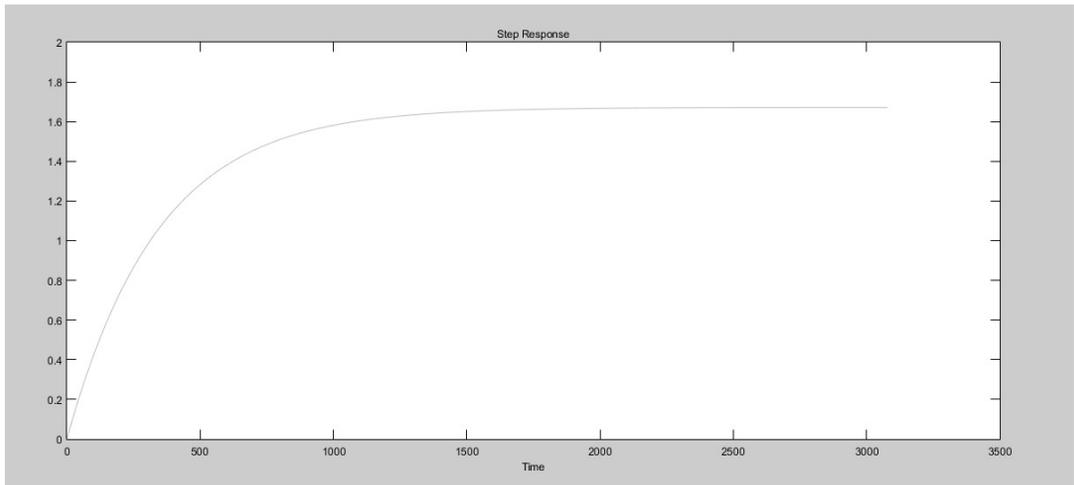
Para hallar la función de transferencia de la planta se hizo uso de una las herramientas con que cuenta Matlab, la cual tiene por nombre “ident”, donde se emplean los datos de la planta para obtener la función de transferencia, dichos datos fueron los datos de entrada, tiempo de muestreo y los datos de salida.

Ya con esto se logra encontrar una función de transferencia de primer orden (ver ecuación 9) pues la planta es de temperatura y esta responde de una manera lenta.

*Ecuación 9*

$$G(s) = \frac{0.004878}{s + 0.002918}$$

Como respuesta de esta función se evidencia que la planta se vuelve más estable, ya que, tiene un incremento de temperatura más controlado respecto a la anterior, de igual manera, también logra estabilizar su valor final, del cual cabe resaltar que el tiempo de estabilización obtenido fue de 12.55 minutos, lo cual se determinó como positivo al tener en cuenta que una planta de temperatura de este tipo no actúa inmediatamente, esto se observó al analizar que después de tomar el intervalo de tiempo en el cual el sistema se ponen en marcha, este oscilaba entre los 10 y los 15 minutos. Esta respuesta de estabilización se puede observar en la figura 59.



*Figura 59 Respuesta de la planta con la función de transferencia. Fuente: propia.*

## **12. VALIDACIÓN DEL SISTEMA**

Para la validación del sistema de inyección de dos etapas, se llevará a cabo un proceso de producción de probetas tipo hueso para ensayos mecánicos, siguiendo las especificaciones establecidas en la norma ASTM D638. Estas probetas serán fabricadas utilizando el material plástico procesado por el sistema de inyección, lo que permitirá evaluar la calidad y resistencia del producto obtenido. Los ensayos mecánicos se realizarán para determinar las propiedades mecánicas del material y su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga y esfuerzo. Vale destacar que este prototipo tiene una función educativa y de investigación, ya que servirá como herramienta de aprendizaje para los estudiantes de la Corporación Universitaria Comfacauca que estudian resistencia de materiales, materiales de ingeniería, procesos de manufactura y realizan investigaciones en áreas afines a estos tópicos. Por lo tanto, este proceso de validación es fundamental para asegurar que el sistema de inyección cumpla con los estándares requeridos y garantizar su eficiencia y fiabilidad en la producción de piezas de calidad.

### **12.1. Diseño del molde de inyección**

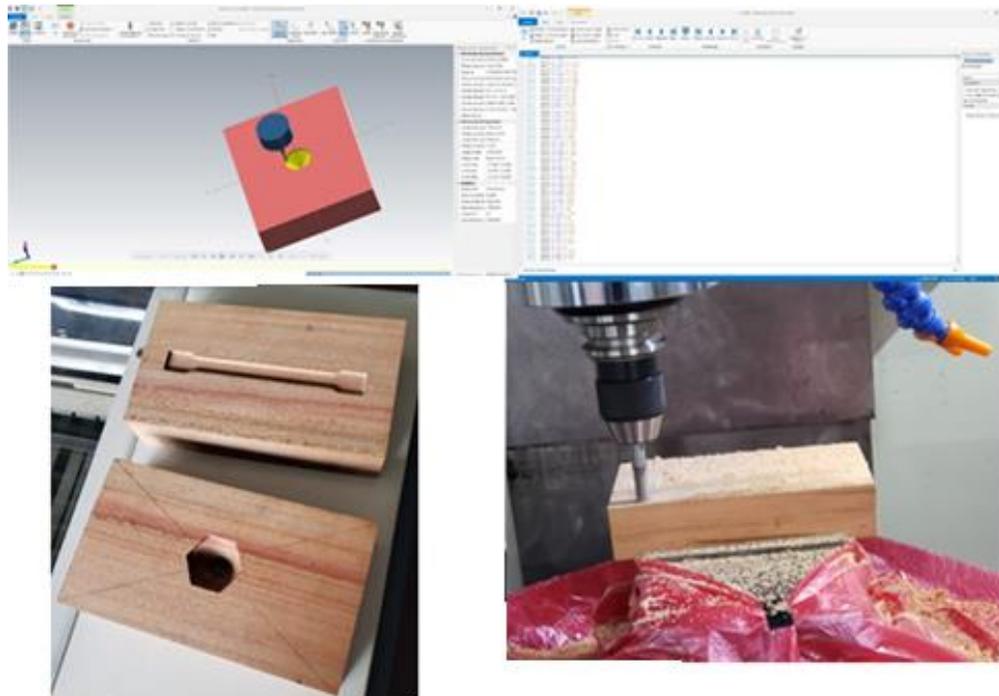
Para desarrollar el molde de la probeta para el tipo de ensayos designados anteriormente, se sigue la normativa ASTM D638 evidenciada en la figura 10 del marco teórico.

Con las dimensiones designadas se desarrolla un molde provisional fabricado en un bloque madera con 21 cm de longitud, 10 cm de ancho y 5 cm de espesor. Este bloque de madera compacto se designó a utilizar debido a la presión a la que este será sometido por el sistema de inyección, por lo cual se consideró que sería ideal a pesar del espesor de la probeta que el bloque sea lo suficientemente macizo para soportar la presión ejercida sobre él. El molde se desarrolló en una máquina CNC FAST MILL VMC 85OE en las instalaciones del Tecnoparque Nodo Popayán, por medio del torno, el cual permitió dar un correcto cumplimiento de la normativa respecto a sus dimensiones.

Con el molde finalizado, entran dos variables a considerar para un correcto resultado al llevar a cabo la inyección de material. El primero implica desarrollar una pequeña

cavidad por donde escape la presión ejercida sobre el molde, en la cual se realizaron dos venas por ambos lados de la cavidad de la probeta, no solo con el fin de compensar la presión interna ejercida, sino también que al llenarse de material el molde, este sirva como indicador de que la probeta está terminada observando un mínimo escape de material fundido por la cavidad. El molde consta de dos bloques (los cuales se posicionan verticalmente uno encima del otro para completar en su totalidad el molde) de madera rectangular con las mismas dimensiones, por lo que se determinó que un bloque abarcaría la forma de la probeta y en el otro las denominadas venas de escape, con el fin de no interferir con el espacio de la probeta.

La segunda variable a considerar para el molde consiste en la entrada que debe tener el molde para que pueda acoplarse a la boquilla del sistema de inyección, figura 25. Por lo cual se tomaron las medidas de la boquilla y por medio del software Mastercam se determinó el torneado de una cavidad que encajara correctamente con la boquilla para el correcto paso de material una vez inyectado hasta el molde en su totalidad. Cabe resaltar de que la boquilla se realizó en la parte superior del bloque de madera que también abarca las venas de escape en el lado contrario. El proceso de diseño y fabricación del molde se puede apreciar en la figura 60.



*Figura 60 Proceso de fabricación del molde. Fuente: propia.*

Una vez finalizado el molde, se procede a su integración al sistema de inyección de dos etapas. Primero, se crea una estructura que actúa como plataforma, diseñada para ajustar la altura del molde y asegurarlo de manera firme a la boquilla del sistema de inyección. Esto garantiza que la presión ejercida sobre el molde no genere movimientos involuntarios que puedan afectar la fabricación de las probetas. Se fabricó una pequeña estructura y una plataforma que se ajustara a las medidas establecidas en la máquina, específicamente al área disponible bajo el sistema de inyección para el molde. La figura 61 muestra cómo se implementó esta solución.



*Figura 61 Soporte del molde. Fuente: propia.*

## **12.2. Pruebas de inyección del material**

Al contar con el sistema de inyección de dos etapas en funcionamiento, finalmente se prosigue con la fabricación de los cuerpos de ensayo en forma de probetas, para las cuales se dispuso de tres tipos de materiales:

- **Azul:** El cual se identifica como polipropileno para inyección.
- **Morado:** El cual se identifica como polietileno de alta densidad denominado “PEAD (2) soplado”.
- **Amarillo:** El cual se identifica igual que el morado como polietileno de alta densidad denominado “PEAD (2) soplado”.

Estos materiales mencionados se visualizan en forma de pellet, el cual es ideal para depositar en la tolva e ingresar al cilindro para su extrusión y seguidamente su inyección, ver figura 62. Vale destacar que estos materiales fueron obtenidos de la empresa de reciclaje AREMARPO.



Figura 62 Polímeros HDPE y PP. O polímeros reciclados en forma de pellet. Fuente: propia.

Con lo anterior mencionado, se llevan a cabo la producción de las probetas, en primera instancia con los materiales individuales, a fin de observar su capacidad de conformado.

Aquí, tanto el material amarillo, como el morado, debido a su alta densidad, no fueron capaces de adoptar la forma completa del molde, como se evidencia en la figura 63. Con base en la tabla 1, se asume que, al ser materiales muy densos (de 0.93 a 0.97 g/cm<sup>3</sup>), se obstruye el paso de material en la cavidad que conecta el cilindro de inyección con el molde.



Figura 63 Primeros intentos resultantes para molde con material azul y amarillo. Fuente: propia.

Por otro lado, el material azul, ver figura 64, al ser de baja densidad (0.9 g/cm<sup>3</sup>) para inyección fue capaz de completar el molde generando una probeta resultante de aproximadamente 6 gr, indicando que el material azul tiene potencial para usarse con la máquina prototipo en la fabricación de productos útiles.



*Figura 64 Resultado de inyección de material azul para fabricación de probeta. Fuente: propia.*

Es importante destacar que, en las tres primeras pruebas de inyección con materiales azul, amarillo y morado, se utilizó una cantidad de 15 gramos por material en cada prueba. Esta cantidad se ajustó considerando que al inyectar el material y debido al diseño del molde, una pequeña proporción del material se queda en la cavidad que conduce el flujo hacia el molde. También se observó una proporción mínima pero visualmente notable, que describimos como "venas", que se acumula en los bordes extremos de las paletas de la probeta.

En lo que respecta a la temperatura aplicada a cada inyección, se aplicó una distribución de temperaturas subdivididas en las etapas de precalentamiento (160 °C para la resistencia térmica 1), calentamiento (180 °C para la resistencia térmica 2) y temperatura de inyección (200 °C para la resistencia térmica 3, la cual es la última antes de llegar al cilindro donde el material se inyecta). En lo que respecta al cilindro de extrusión y en el cilindro de inyección se establecen 200 °C para la resistencia térmica 4, la cual se encarga de mantener el material en el estado generado por la parte extrusora para que mantenga temporalmente sus propiedades. Esto debido, a que en la búsqueda del estado del arte se encontró que la temperatura de fusión de estos polímeros oscilaba entre 130 °C y 200 °C [65].

Se establecieron las temperaturas a lo largo del proceso de extrusión teniendo en cuenta que el material estaría en movimiento hacia la etapa de inyección. De esta manera, el material alcanzaría una temperatura máxima que no afectara la inyección resultante debido al corto tiempo al que estaría sometido a dicha temperatura dentro del cilindro de inyección. Sin embargo, sería suficiente para que el material adoptara un estado más maleable que permitiera inyectarse al molde de forma adecuada.

Cabe resaltar que estas temperaturas se trataron con cierta proporcionalidad a la variable de velocidad, la cual se estableció desde el variador en 15 Hz (debido a que fue la velocidad a la que se ajustaban las temperaturas que se consideraron según la literatura investigada) ajustándose a las temperaturas mencionadas anteriormente. Fue observado que, si se disminuye la velocidad se debe disminuir la temperatura porque el material al ser transportado lentamente a altas temperaturas podría quemarse y si el material se transporta rápidamente podría no adquirir un cambio de estado llegando de esta manera muy sólido para ser inyectado.

Para llevar un mejor registro de funcionalidad del sistema se tomó un tiempo estándar para la puesta en marcha del sistema en la producción. Tenido en cuenta la respuesta de la planta de temperatura simulada (12.55 minutos), se determinó que, en 10 minutos las resistencias térmicas ya se encuentran en las temperaturas mencionadas anteriormente y en 15 minutos los cilindros del sistema de extrusión e inyección se encuentran en total disposición para el paso de material.

Una vez realizada la primera prueba con cada material, se determinó que, si el material morado y amarillo tenían muy alta densidad para ser inyectados, se llevarían a cabo mezclas, con el material azul (baja densidad) que permitieran su inyección una vez extruidos. Con lo anterior mencionado se realizó una fase experimental de mezclas con los materiales para observar el comportamiento del resultado respecto a la flexibilidad o maleabilidad que éste puede adquirir para poder ser inyectado.

Al determinar que el material azul (PP) era el que con mayor facilidad se podían producir probetas, se llegó a la conclusión de mezclarlo tanto con el PEAD amarillo y morado. Cabe resaltar que en primera instancia cuando se depositó por primera vez el material morado o el amarillo, estos se obstruyeron al salir de la etapa de extrusión debido a que sus altas densidades no les permitían ser lo suficientemente maleables para ser transportados e inyectados correctamente, sino depositando material azul tras haber depositado morado o amarillo que estos gracias a la solubilidad de los pellets azules lograron salir, evidenciando la facilidad que tiene

este material azul para ser transportado por el sistema hasta su salida. Para la prueba de producción primero se realizó una mezcla equitativa y uniforme de 15 gramos de pellets azul (PP) con 15 gramos de pellets morados (PEAD) el cual dio resultados positivos al inyectarse. Esto mostró que el PP de baja densidad puede aportar sus características de maleabilidad a un polímero de alta densidad (PEAH), lo que resultó como la primera probeta con características del material morado (AM) como se evidencia en la figura 65.



*Figura 65 Primer resultado de inyección para la mezcla azul-morado (AM). Fuente: propia.*

Aunque fue un resultado positivo la mezcla, se consideró que la proporción de PP-Azul no debía ser tanto si se quería obtener una probeta de PEAD-Morada más pura, que tuviera más asentada las características de este material, por lo cual, se tomó en consideración disminuir la proporción hasta el punto en que el material PEAD-Morado sea capaz de inyectarse. Durante las diversas pruebas realizadas, se observó una clara diferencia en cada probeta al ser inyectada. A medida que se aumentaba la proporción de pellets morados y se reducía la de pellets azules, los resultados mejoraban, pero el esfuerzo requerido para la inyección aumentaba debido al aumento en la densidad del material resultante. Sin embargo, se notó que esto también variaba con la temperatura. El material azul, al ser de menor densidad, necesitaba una temperatura menos elevada para ser inyectado, pero esto resultaba en una probeta frágil e inapropiada para las pruebas mecánicas, ver figura 66. De esta forma se decidió ajustar la temperatura a 220 °C, con la cual se obtuvieron mejores resultados y una probeta más adecuada para las pruebas.



*Figura 66 Resultado fallido de inyección de material para probeta azul al someterse a altas temperaturas.  
Fuente: propia.*

En relación a la proporción de los materiales, se trabajó con 21% PP-Azul y 79% PEAD-Morado. Cabe resaltar que se mezclaron 30 gramos en total para elaborar 6 probetas considerando el número de probetas mínimo para obtener propiedades mecánicas según la normativa ASTM D638.

Analizando los resultados de las proporciones de mezclas realizadas con PP-Azul y PEAD-Morado, se consideró aplicar la misma temperatura de inyección (220°C), velocidad (15Hz) y proporciones para mezclar con el PEAD-Amarillo. Esto resultó positivamente en la fabricación de probetas con mezcla de material amarillo. Estas probetas en la proporción mencionada se denominaron de AM para la mezcla PP-Azul+PEAD-Morado y AA para la mezcla PP-Azul+PEAD-Amarillo.



Figura 67 Probetas de pruebas resultantes de la mezcla de material amarillo con azul (AA) y morado con azul (MA). Fuente: propia.

Al haber obtenido probetas tanto AM como AA, se decide realizar una última mezcla que involucre los tres tipos de materiales, abreviados como AAM. Esta mezcla se lleva a cabo para analizar qué tan homogénea puede resultar y observar que datos puede aportar que favorezcan tanto a los parámetros de la máquina como las otras mezclas en sí.

Para esta prueba al tener dos materiales de alta densidad en primera instancia se aplican las mismas temperaturas y velocidad, pero diferentes proporciones considerando que ahora serían 20 gr de PP-Azul, 15 gr PEAD-Amarillo y 15 gr PEAD-Morado. De esta forma, al reducir la cantidad de material denso se opta de mejor manera en este caso por un resultado positivo considerando una mayor homogeneidad entra las mezclas y considerando el hecho de que la cantidad de PP-Azul fuera suficiente para proporcionar maleabilidad a la mezcla triple que sería extruida y posteriormente inyectada al molde. Estas probetas en la proporción mencionada se denominaron de AAM para la mezcla PP-Azul+PEAD-Amarillo+PEAD-Morado.

La figura 68 muestra el resultado de las probetas inyectadas.

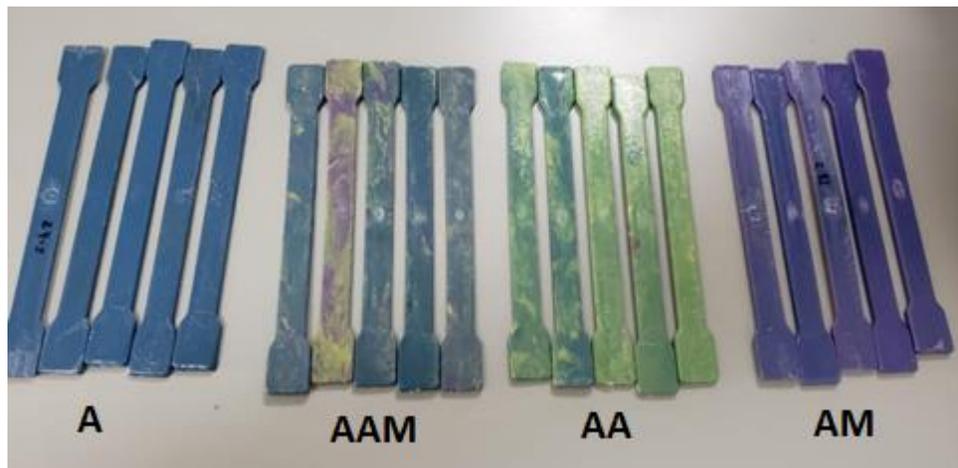


Figura 68 Lote de probetas elaboradas de cada tipo para sometidas a ensayos mecánicos. Fuente: propia.

### **13. CARACTERIZACION DE LAS PROBRETAS**

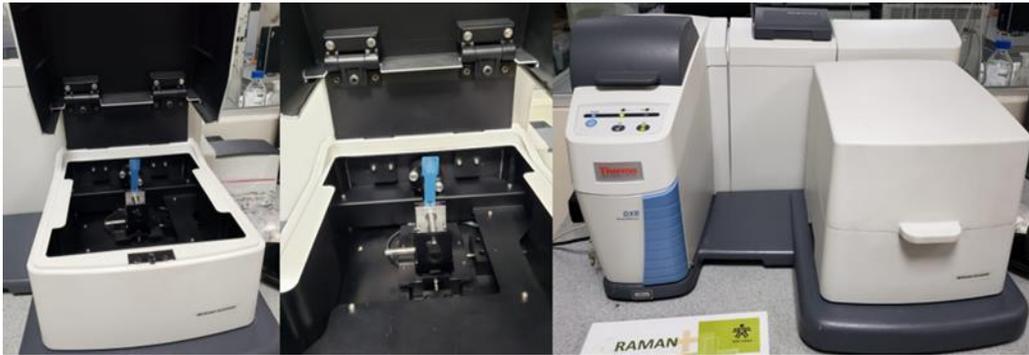
A seguir, se aborda la caracterización fisicoquímica mediante espectroscopia Raman y la caracterización mecánica a través de ensayos de tracción y flexión de las probetas producidas en el sistema de inyección de dos etapas. Se examinarán las propiedades estructurales y mecánicas de las probetas, proporcionando una visión completa de su comportamiento y calidad, para completar la validación del sistema implementado.

#### **13.1. Caracterización fisicoquímica por Espectroscopia**

##### **RAMAN**

Con la ayuda de las pruebas RAMAN se pudo observar a nivel químico que tanto porcentaje de material existe realmente en el cuerpo de ensayo después de todos los procesos a los que fue sometido para llegar a ser un producto útil. El PP fue el de menor porcentaje, con ello se tuvo en consideración que este debido a su densidad y flexibilidad al ser usado para mezcla con los otros dos materiales poliméricos (PEAD) pudo haberles degradado cierto porcentaje de las propiedades mecánicas que estos tenían, independientemente del hecho de que el PP permitiera una mayor comodidad para ser inyectados. Con lo mencionado anteriormente también se podría de cierta manera ratificar la dispersión de los datos entre el PEAD reciclado resultante en los ensayos y los valores del HDPE (tanto el reciclado como el virgen) encontrados en la literatura.

Para la caracterización fisicoquímica del material, se usó Espectroscopia RAMAN, Para esto se ubicó una probeta o un segmento de ella en un área ajustable del espacio interior del espectrómetro. A seguir, se hace incidir un haz de luz que hace contacto y se dispersa por la muestra presentándose un cambio en la frecuencia por la naturaleza de la composición química del material y las vibraciones atómicas del material. Como resultado es obtenida una gráfica que muestra la intensidad de la radiación dispersa en función de la energía del fotón dispersado, expresada como un cambio en el número de onda o desplazamientos Raman ( $\text{cm}^{-1}$ ). La figura 69 muestra la disposición del material al interior del espectrómetro.



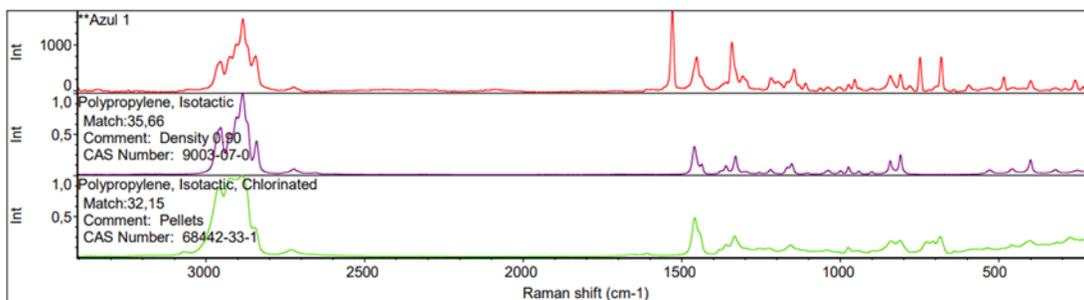
*Figura 69 Máquina de Ensayos Raman. Fuente: propia.*

En esta prueba se usaron solo cuatro cuerpos de ensayos cada uno perteneciente a una de las 4 categorías:

- A: PP-Azul
- AA: PEAD-Amarillo+PP-Azul
- AM: PP-Azul+PEAD-Morado
- AAM: PEAD-Amarillo+PP-Azul+PEAD-Morado

Los resultados obtenidos respecto al PP-Azul se evidencia en la figura 70, donde se reitera el polipropileno como base de esta probeta. Cabe aclarar que la columna Match en la parte inferior izquierda de la ilustración indica el porcentaje de coincidencia con la huella química del polímero registrado en la base de datos del equipo. El bajo porcentaje de coincidencia del PP puro puede ser debido al historial de tratamientos térmicos al que ha sido sometido este material que puede llevar a su degradación y pérdida de características básicas, como reportado en la literatura [66].

Search results for: \*\*Azul 1  
 Date: Wed May 03 15:25:21 2023 (GMT-05:00)  
 Search algorithm: Correlation  
 Regions searched: 3405,96-199,88



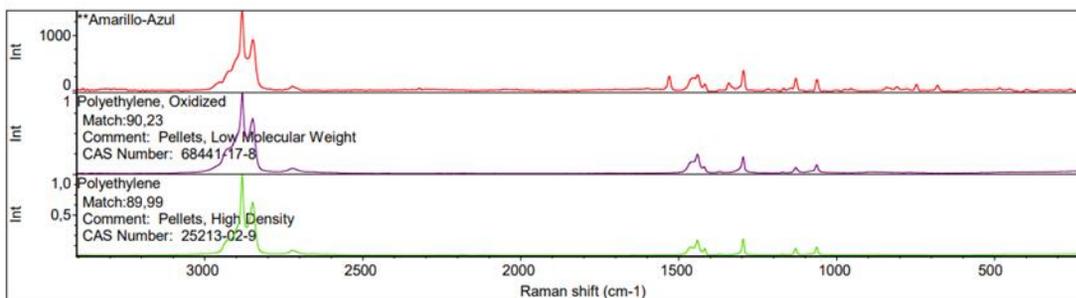
Search results list of matches

Index	Match	Compound Name	Library Name
1	67	35,66 Polypropylene, Isotactic	HR Raman Polymer Library
2	66	32,15 Polypropylene, Isotactic, Chlorinated	HR Raman Polymer Library
3	62	28,46 Poly(4-Methyl-1-Pentene)	HR Raman Polymer Library
4	11	23,52 Ethylene/Propylene Copolymer	HR Raman Polymer Library
5	56	21,45 Polyethylene, Oxidized	HR Raman Polymer Library
6	49	21,41 Polyethylene	HR Raman Polymer Library
7	80	20,87 Poly(Vinyl Stearate)	HR Raman Polymer Library
8	50	20,20 Polyethylene, Chlorinated 25%	HR Raman Polymer Library
9	10	19,53 Ethylene/Ethyl Acrylate Copolymer	HR Raman Polymer Library
10	9	19,35 Ethylene/Acrylic Acid Copolymer	HR Raman Polymer Library

Figura 70 Resultados Raman de la probeta azul. Fuente: propia.

En la mezcla AA, figura 71 se identificó que su huella química coincidía en un 90% con el polietileno. Algo esperado dada la mayor proporción de este material en esta composición.

Search results for: \*\*Amarillo-Azul  
 Date: Wed May 03 15:51:54 2023 (GMT-05:00)  
 Search algorithm: Correlation  
 Regions searched: 3405,96-199,88



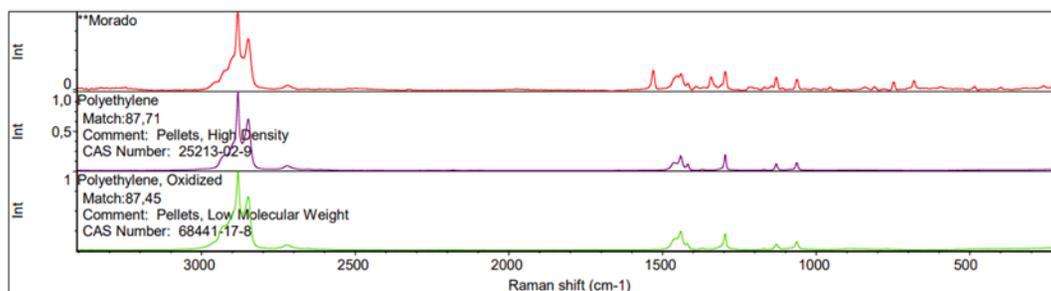
Search results list of matches

Index	Match	Compound Name	Library Name
1	56	90,23 Polyethylene, Oxidized	HR Raman Polymer Library
2	49	89,99 Polyethylene	HR Raman Polymer Library
3	50	88,22 Polyethylene, Chlorinated 25%	HR Raman Polymer Library
4	12	85,33 Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer 86/14	HR Raman Polymer Library
5	10	84,71 Ethylene/Ethyl Acrylate Copolymer	HR Raman Polymer Library
6	13	83,55 Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer 82/18	HR Raman Polymer Library
7	80	83,29 Poly(Vinyl Stearate)	HR Raman Polymer Library
8	9	82,44 Ethylene/Acrylic Acid Copolymer	HR Raman Polymer Library
9	14	76,56 Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer 75/25	HR Raman Polymer Library
10	15	76,45 Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer 72/28	HR Raman Polymer Library

Figura 71 Resultados Raman de la probeta AA. Fuente: propia.

Un resultado similar fue observado para la mezcla AM, figura 72, se encontró una coincidencia química con el polietileno en un 88%.

Search results for: \*\*Morado  
 Date: Wed May 03 15:38:21 2023 (GMT-05:00)  
 Search algorithm: Correlation  
 Regions searched: 3405,96-199,88



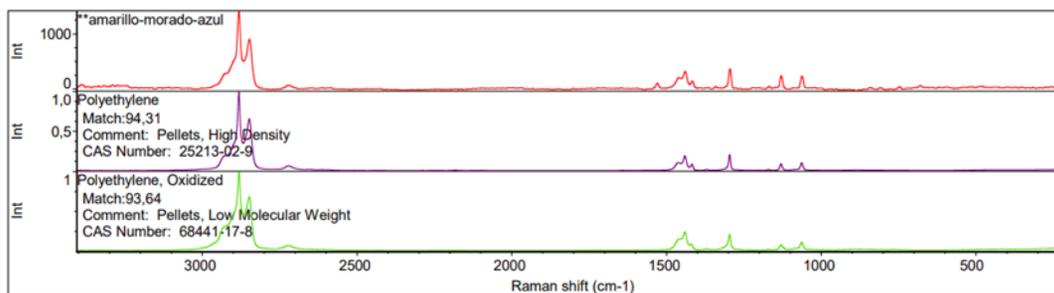
Search results list of matches

Index	Match	Compound Name	Library Name
1	49	87,71 Polyethylene	HR Raman Polymer Library
2	56	87,45 Polyethylene, Oxidized	HR Raman Polymer Library
3	50	85,30 Polyethylene, Chlorinated 25%	HR Raman Polymer Library
4	10	82,41 Ethylene/Ethyl Acrylate Copolymer	HR Raman Polymer Library
5	12	82,31 Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer 86/14	HR Raman Polymer Library
6	80	80,98 Poly(Vinyl Stearate)	HR Raman Polymer Library
7	13	80,70 Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer 82/18	HR Raman Polymer Library
8	9	79,66 Ethylene/Acrylic Acid Copolymer	HR Raman Polymer Library
9	14	74,21 Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer 75/25	HR Raman Polymer Library
10	15	74,10 Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer 72/28	HR Raman Polymer Library

Figura 72 Resultados Raman de la probeta AM. Fuente: propia.

Finalmente, la mezcla AAM, este al ser mayormente resultado de la unión de PEAD-Amarillo y PEAD-Morado se pude observar la predominancia química del polietileno de alta densidad, ver figura 73, con una coincidencia del 94%.

Search results for: \*\*amarillo-morado-azul  
 Date: Wed May 03 15:59:47 2023 (GMT-05:00)  
 Search algorithm: Correlation  
 Regions searched: 3405,96-199,88



Search results list of matches

Index	Match	Compound Name	Library Name
1	49	94,31 Polyethylene	HR Raman Polymer Library
2	56	93,64 Polyethylene, Oxidized	HR Raman Polymer Library
3	50	91,76 Polyethylene, Chlorinated 25%	HR Raman Polymer Library
4	12	88,97 Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer 86/14	HR Raman Polymer Library
5	10	88,29 Ethylene/Ethyl Acrylate Copolymer	HR Raman Polymer Library
6	13	86,98 Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer 82/18	HR Raman Polymer Library
7	80	85,84 Poly(Vinyl Stearate)	HR Raman Polymer Library
8	9	85,54 Ethylene/Acrylic Acid Copolymer	HR Raman Polymer Library
9	15	79,59 Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer 72/28	HR Raman Polymer Library
10	14	79,53 Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer 75/25	HR Raman Polymer Library

Figura 73 Resultados Raman de la probeta AAM. Fuente: propia.

#### **14. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA**

Como fue mencionado anteriormente, existen 4 categorías de resultantes de materiales inyectados (3 mezclas y uno puro), estos se clasificaron de la siguiente manera:

- A: PP-Azul
- AA: PP-Azul+PEAD-Amarillo
- AM: PP-Azul+PEAD-Morado
- AAM: PEAD-Amarillo+PP-Azul+PEAD-Morado

Para la representación documental de los datos obtenidos a cada probeta, estas se designaron con números en orden ascendente junto con su clasificación, es decir:

- A1, A3, A4 y A5, es en referencia a las 5 probetas de material PP-Azul.
- AA1, AA2, AA3, AA4 y AA5, es en referencia a las 5 probetas resultantes de la mezcla PP-Azul+PEAD-Amarillo
- AM1, AM2, AM3, AM4 y AM5, es en referencia a las 5 probetas resultantes de la mezcla PP-Azul+PEAD-Morado.
- AAM1, AAM2, AAM3, AAM4 y AAM5 Es en referencia a las 5 probetas resultantes de la mezcla PEAD-Amarillo+PP-Azul+PEAD-Morado

Los ensayos mecánicos fueron realizados en una máquina universal de ensayos (HUNG TA instrument Co, ttd / HT-2402 MATERIAL TESTING MACHINE) perteneciente a las instalaciones del Tecnoparque Nodo Cali, ver figura 74. Este equipo cuenta con el software U.T.M Testing Program, en el cual se evidencian, analizan y recolectan los datos de cada cuerpo de prueba.



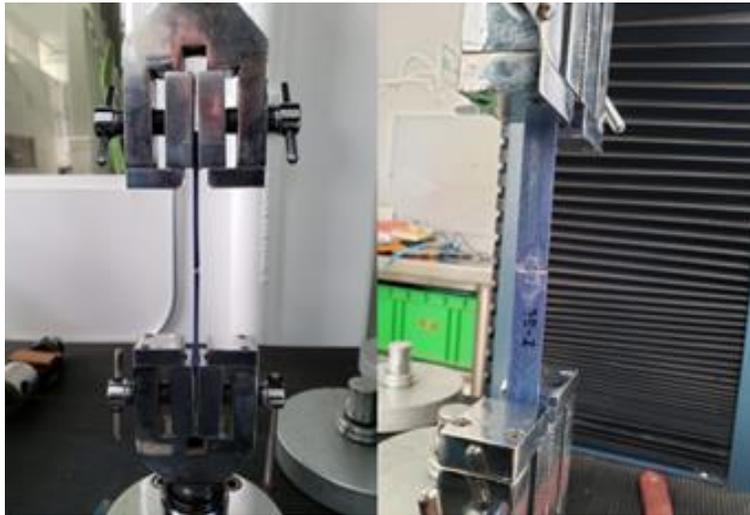
Figura 74 Máquina Universal de Ensayos. Fuente: propia.

La metodología para llevar a cabo el proceso se basó en el siguiente orden:

1. Ajustar en el software los parámetros según el material o cuerpo a someter a la máquina y a la normativa que lo rija.
2. Establecer en el software el tipo de prueba a realizar y la velocidad del ensayo, fue de un valor de 5mm/min aproximadamente.
3. Ajustar la máquina al tamaño de la muestra, ya que esta es equipada con pinzas que deben sujetar el cuerpo de ensayo de tal manera que no presente un obstáculo al comenzar las pruebas.
4. Ejecutar desde el software el tipo de prueba a realizar para la puesta en marcha de la máquina.
5. Finalización de la puesta en marcha de la máquina y a su vez la recopilación y almacenamiento de los datos recolectados en la ejecución de la prueba.

#### **14.1. Prueba con ensayos de tracción.**

Esta prueba consistió en sujetar la probeta de manera vertical y seguidamente aplicar con la pinza en la parte superior una fuerza hacia arriba mientras la pinza que sujeta la parte inferior permanece estática hasta el punto de fractura como se evidencia en la figura 75.



*Figura 75 Ensayo de tracción en probetas con la Máquina Universal de Ensayos. Fuente: propia.*

Siguiendo la normativa ASTM D638, se ajustó la velocidad de prueba de tal manera que la ruptura se generara entre los 30 segundos y los 5 minutos para que los resultados fueran verídicos, la cual se dio satisfactoriamente acorde a la norma.

A medida que el ensayo de tracción se ejecuta, una recopilación de datos a tiempo real se genera en el software donde se visualizan en representaciones gráficas y numéricas que son almacenadas y posteriormente guardadas en formato Excel. La representación gráfica de los datos en tiempo real de una probeta ensayada se puede evidenciar en la figura 76.



Figura 76 Representación visual de la ejecución del software para ensayos de tracción. Fuente: propia.

La finalidad de las pruebas de tracción fue obtener para cada probeta los valores identificados como:

**Time (Tr):** Tiempo hasta la ruptura del cuerpo de ensayo (Segundos)

**Peak Load (PL):** Carga Máxima (N)

**Peak Stress (PSS):** Esfuerzo Máximo (MPa)

**Peak Disp (PD):** Pico de Desplazamiento (mm). Indica el punto máximo de deformación antes de que la muestra falle o se fracture.

**Peak Strain (PSN):** Porcentaje de deformación Máxima (%)

Al aplicar el ensayo de tracción para 5 probetas de una categoría se puede observar un patrón en cada resultado que determina la veracidad respecto a los procesos con los cuales las probetas fueron fabricadas, es decir, si todas las probetas sometidas a tracción son azules, entonces se considera que los valores mencionados anteriormente de cada probeta no deben estar demasiado alejados unos de otros, sin embargo, si esto ocurre y por ejemplo el tiempo de ruptura de una probeta es más extenso que las otras, entonces indicaría que tiene una mayor resistencia, lo cual, al haber un registro de cada probeta se buscaría bajo que parámetros se

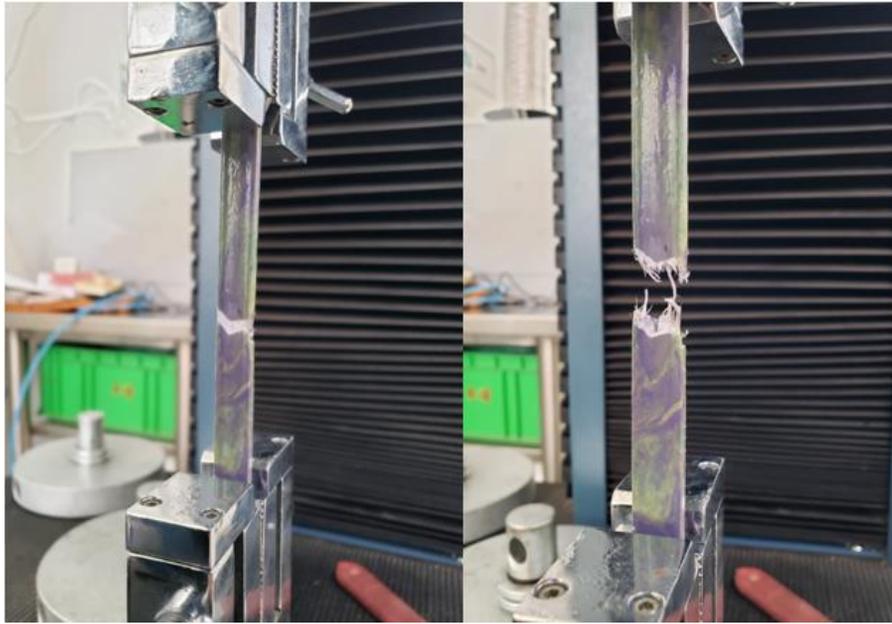
fabricó y de esta manera poder hacer la validación de resultados para una optimización final de la máquina prototipo. Cabe resaltar que todos los datos resultantes de los cuerpos de ensayo otorgarán cierta relevancia y soporte a los parámetros de inyección.

Los datos obtenidos de cada una de las 20 probetas clasificada y designadas para esta prueba se organizaron seguidamente de almacenarse en una hoja de archivo de la herramienta Excel, con el fin de representar de la mejor manera la información aportada por la Máquina Universal de Ensayos a través del software como se evidencia en la figura 77.

MEZCLAS DE MATERIAL		Tr	PL	PSS	PD	PSN
A = Azul	A1	34,6	474,6063	12,1694	2,3942	1,9951
AA= Amarillo-Azul	A2	66,1	709,9582	18,2041	5,216	4,3467
AM= Azul-Morado	A3	42,9	567,6105	14,5541	3,4623	2,8853
AAM= Amarillo-Azul-Mordado	A4	41	565,7638	14,5068	3,212	2,6766
	A5	56,7	668,137	17,1317	4,4859	3,7383
	AA1	44,1	533,8851	13,6894	3,3538	2,7949
	AA2	45,1	536,4524	13,7552	3,4707	2,8922
<b>VARIABLES TOMADAS DE LOS ENSAYOS</b>	AA3	44,4	525,7389	13,4805	3,5458	2,9548
Tr=tiempo de ruptura (segundos)	AA4	48,3	548,3687	14,0607	3,8712	3,226
Peak Load = PL = carga máxima (N)	AA5	32,8	427,3909	10,9587	2,5944	2,162
Peak Stress = PSS= Esfuerzo Máximo (MPa)	AM1	46,7	472,0285	12,1033	3,5708	2,9756
Peak Displacement= PD= Pico de desplazamiento (mm)	AM2	35,5	410,5243	10,5263	2,6612	2,2177
Peak Strain = PSN= Porcentaje de deformación máxima (%)	AM3	36,7	402,4652	10,3196	2,8615	2,3846
	AM4	59,6	587,1275	15,0546	4,7348	3,9456
	AM5	37,3	456,647	11,7089	2,2356	1,863
	AAM1	216,2	527,6088	13,5284	5,0916	4,243
	AAM2	38,5	452,9971	11,6153	2,9366	2,4471
	AAM3	36,9	470,2082	12,0566	2,9032	2,4194
	AAM4	37,9	415,9965	10,6666	2,9449	2,4541
	AAM5	32,9	408,7733	10,4814	2,5778	2,1481

Figura 77 Datos resultantes de los ensayos de tracción. Fuente: propia.

De esta prueba se observó que la probeta que más tiempo tardó en romperse fue la perteneciente a la mezcla y categoría AAM1, de la cual se analizó en sus resultados obtenidos que sus valores PL, PSS, PD y PSN superan notoriamente los de las otras mezclas pertenecientes como no pertenecientes a su categoría. El tener un intervalo de ruptura más extenso que otros indicó la gran flexibilidad de sus fibras al ser sometida la probeta al ensayo de tracción como se puede evidenciar en la figura 78.



*Figura 78 Ensayo mecánico de la mezcla AAM, probeta1 mostrando desprendimiento en forma de fibras lo que contribuye a su alto porcentaje de deformación. Fuente: propia.*

A partir de los datos obtenidos de los ensayos de tracción, se llevó a cabo por medio del software OriginPro, los gráficos resultantes de los ensayos realizados según el tipo de material o mezcla.

La figura 79, muestra los resultados de las 5 pruebas con el material A. Al establecer las gráficas se puede observar evidentemente que la probeta con mejores resultados es la A2, ya que, demuestra una mayor resistencia que las otras muestras al someterse al ensayo de tracción. Al buscar bajo qué condiciones se elaboró esta probeta, se encontró que la primera resistencia ubicada cerca de a tolva tenía una temperatura de 150°C, la siguiente resistencia ubicada en el centro del cilindro extrusor se encontraba en los 200°C y la última resistencia en el cilindro extrusor que prosigue se encontraba en 250°C, esto sumado a que la temperatura en la resistencia del cilindro de inyección se había establecido en 200°C y la velocidad generada en el motor para el transporte de material que fue establecida para esa prueba de producción fue de 20 Hz.

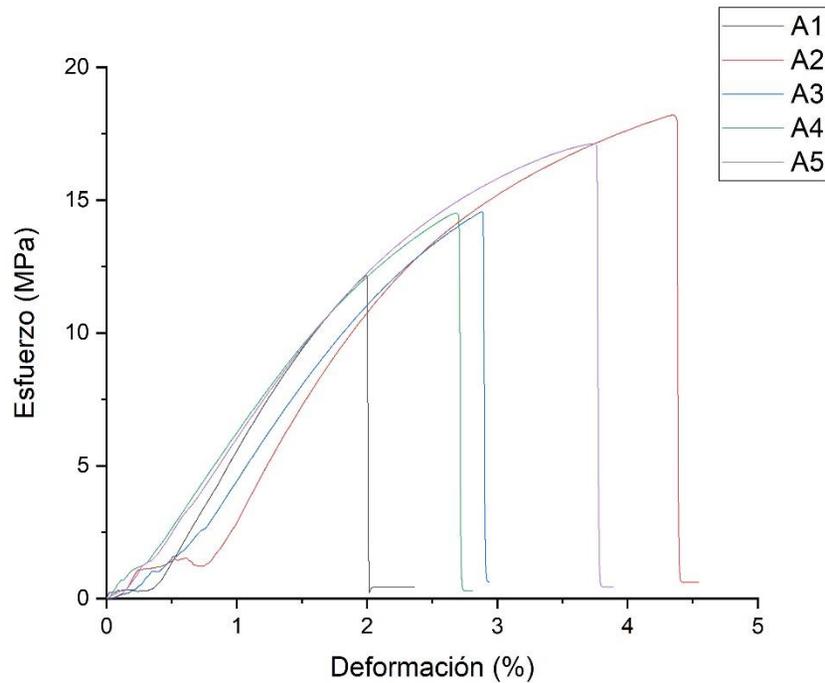


Figura 79 Comportamiento del material A en los 5 ensayos realizados. Fuente: propia.

**Tabla 4** Resume las propiedades mecánicas de la probeta elaboradas con PP-Azul.

Probeta	Modulo elasticidad [MPa]	Resistencia máxima [MPa]	Resistencia a la fractura (MPa)	Ductilidad (%)
A1	8.4	12.16	0.42	1.99
A2	8.96	18.2	0.61	4.34
A3	7.45	14.55	0.69	2.88
A4	7.17	14.5	0.29	2.67
A5	7.32	17.13	0.44	3.73
Promedio	7.86	15.34	0.49	3.12
Desviación Estándar	0.78	2.38	0.15	0.92

Interpretando los valores de las 5 muestras de la tabla 4, el módulo de elasticidad tiene un coeficiente de variación del 9.92% con una media de 7.86 MPa, la resistencia máxima tiene un coeficiente de variación de 15.21% con una media de 15.3 MPa, la resistencia a la fractura tiene un coeficiente de variación de 30.61% con una media de 0.49 MPa y la ductilidad tiene un coeficiente de variación de 29.8% con una media de 3.12 %. Con los valores de la tabla se observó que la

resistencia a la fractura existe una mayor dispersión con respecto a los otros resultados, esto se puede explicar al tener en consideración que en las probetas se sometieron a diferentes temperaturas y en algunos casos diferentes velocidades al estar en la búsqueda de los mejores parámetros a establecer en el sistema para los procesos de extrusión e inyección de material.

La figura 80, muestra los resultados de las 5 pruebas con el material AA. De las gráficas obtenidas de la mezcla AA se puede observar que la probeta con mejores resultados fue la AA4. Para las pruebas de producción de probetas más allá de los valores preestablecidos por el estado del arte, se llevaron a cabo diversas pruebas experimentales a en base a diversos parámetros, sin embargo, gracias a ello a diferencia de las gráficas ilustradas de las probetas A, se puede observar cómo se reduce la dispersión existente entre los datos de los gráficos. Dentro de las condiciones bajo las cuales se elaboró la probeta, se encontró que la primera resistencia ubicada cerca de a tolva tenía una temperatura de 160°C, la siguiente resistencia ubicada en el centro del cilindro extrusor se encontraba en los 180°C y la última resistencia en el cilindro extrusor que prosigue se encontraba en 220°C, esto sumado a que la temperatura en la resistencia del cilindro de inyección se había establecido también en 220°C y la velocidad generada en el motor para el transporte de material que fue establecida para esa prueba de producción fue de 20 Hz.

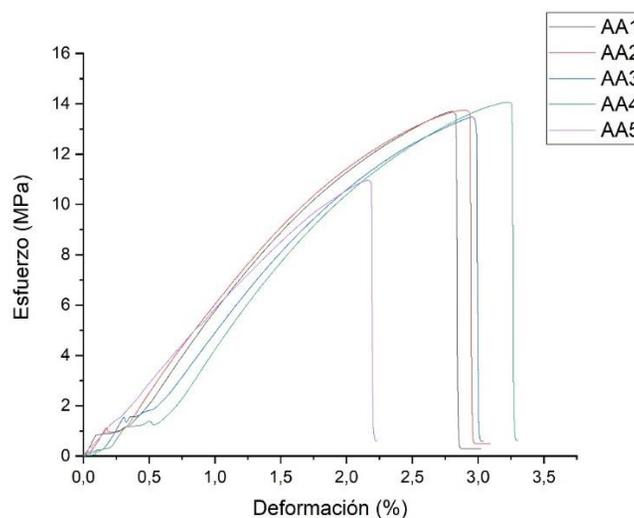


Figura 80 Comportamiento del material AA en los 5 ensayos realizados. Fuente: propia.

**Tabla 5** Resume las propiedades mecánicas de la probeta elaboradas con PP-Azul y PEAD-Amarillo.

Probeta	Modulo elasticidad [MPa]	Resistencia máxima [MPa]	Resistencia a la fractura (MPa)	Ductilidad (%)
AA1	7.3	13.68	0.29	2.79
AA2	6.75	13.75	0.49	2.89
AA3	7.07	13.48	0.61	2.95
AA4	7.51	14.06	0.63	3.22
AA5	6.05	10.95	0.59	2.16
Promedio	6.93	13.18	0.52	2.8
Desviación Estándar	0.57	1.26	0.14	0.39

Interpretando los valores de las 5 muestras de la tabla 5, el módulo de elasticidad tiene un coeficiente de variación del 8.22% con una media de 6.93 MPa, la resistencia máxima tiene un coeficiente de variación de 9.55% con una media de 13.18 MPa, la resistencia a la fractura tiene un coeficiente de variación de 26.92% con una media de 0.52 MPa y la ductilidad tiene un coeficiente de variación de 13.92% con una media de 2.8 %. Con los valores de la tabla se observó que nuevamente para la resistencia a la fractura existe una mayor dispersión con respecto a los otros resultados, esto se puede explicar al tener en consideración que estas probetas también se fabricaron modificando las variables de temperatura y velocidad al igual que las A.

La figura 81, muestra los resultados de las 5 pruebas con el material AM. A partir de las gráficas obtenidas de la mezcla AM se puede observar que la probeta con mejores resultados fue la AM4. Para las pruebas de producción de probetas más allá de los valores preestablecidos por el estado del arte, se llevaron a cabo diversas pruebas experimentales a en base a diversos parámetros, sin embargo, gracias a ello se puede observar cómo se reduce la dispersión existente entre los datos de los gráficos. Dentro de las condiciones bajo las cuales se elaboró la probeta, se observó que fueron las mismas bajo las cuales se elaboró la AA4. La ilustración con los gráficos de los 5 ensayos de la mezcla AM se puede evidenciar en la figura 86.

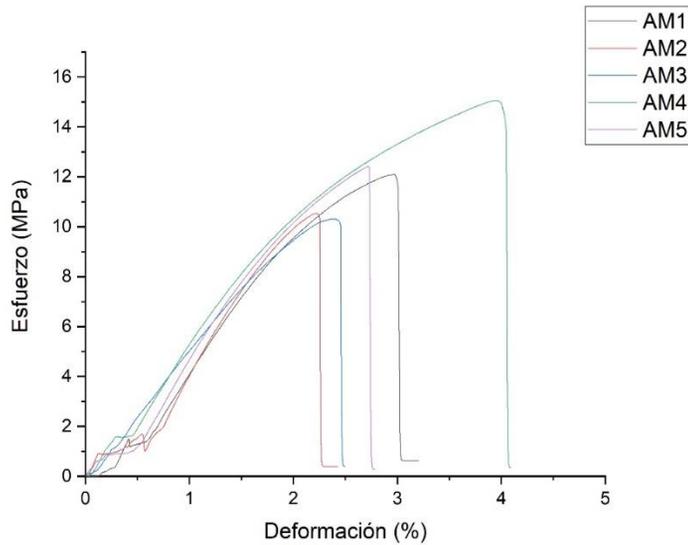


Figura 81 Comportamiento del material AM en los 5 ensayos realizados. Fuente: propia.

**Tabla 6** Resume las propiedades mecánicas de la probeta elaboradas con PP-Azul y PEAD-Morado.

Probeta	Modulo elasticidad [MPa]	Resistencia máxima [MPa]	Resistencia a la fractura (MPa)	Ductilidad (%)
AM1	6.42	12.1	0.63	2.97
AM2	7.44	10.52	0.39	2.21
AM3	5.43	10.31	0.4	2.38
AM4	6.57	15.05	0.35	3.94
AM5	6.84	11.7	0.28	1.86
Promedio	6.54	11.93	0.41	2.67
Desviación Estándar	0.73	1.89	0.13	0.81

Interpretando los valores de las 5 muestras de la tabla 6, el módulo de elasticidad tiene un coeficiente de variación del 11.16% con una media de 6.54 MPa, la resistencia máxima tiene un coeficiente de variación de 15.84% con una media de 11.93 MPa, la resistencia a la fractura tiene un coeficiente de variación de 31.7% con una media de 0.14 MPa y la ductilidad tiene un coeficiente de variación de 30.3% con una media de 2.67 %. Con los valores de la tabla se observó que nuevamente para la resistencia a la fractura existe una mayor dispersión con respecto a los otros resultados, esto se puede explicar al tener en consideración

que estas probetas también se fabricaron alternando los valores de las variables a controlar metódicamente en busca del mejor resultado al igual que las otras mezclas A y AA.

La figura 82, muestra los resultados de las pruebas con el material AMM. Sin embargo, esta ilustración destaca la probeta AAM1 sobre el resto de las probetas ensayadas. Vale destacar que la probeta AAM1, presenta un comportamiento anormal y por eso no se presenta en el gráfico. A partir de las gráficas obtenidas de la mezcla AAM se puede observar que la probeta con mejores resultados fue la AAM4. Al buscar bajo qué condiciones esta fue fabricada, se encontró que coincide con los mismos parámetros usados en la probeta A2.

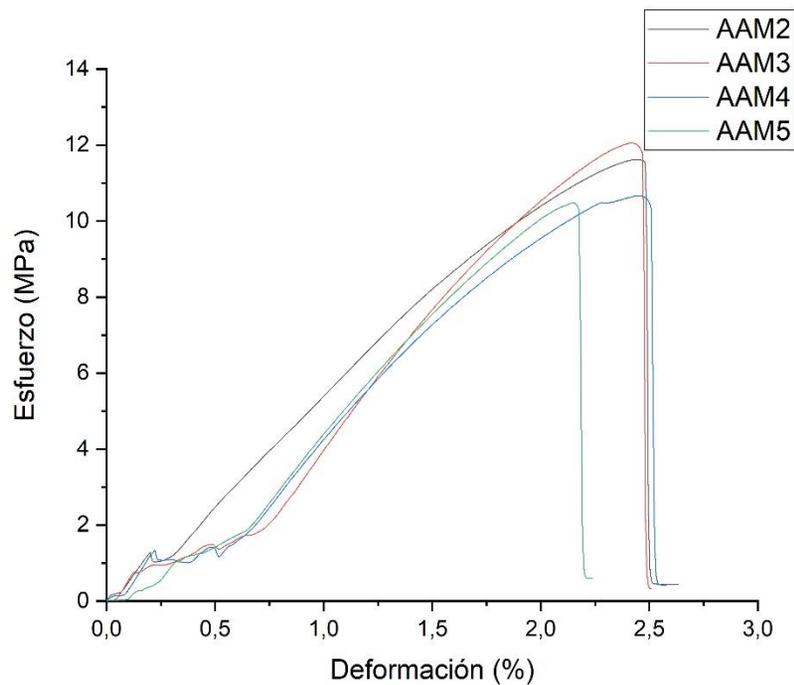


Figura 82 Comportamiento del material AAM en los 5 ensayos realizados. Fuente: propia.

**Tabla 7** Resume las propiedades mecánicas de la probeta elaboradas con PEAD-Amarillo+PP-Azul+PEAD-Morado.

Probeta	Modulo elasticidad [MPa]	Resistencia máxima [MPa]	Resistencia a la fractura (MPa)	Ductilidad (%)
AAM2	5.88	11.61	0.44	2.44
AAM3	7.93	12.05	0.31	2.41
AAM4	6.32	10.66	0.42	2.45
AAM5	6.82	10.48	0.59	2.14
Promedio	6.57	11.66	0.39	2.73
Desviación Estándar	0.9	0.92	0.12	0.45

Interpretando los valores de las 4 muestras de la tabla 7, el módulo de elasticidad tiene un coeficiente de variación del 13.69% con una media de 6.57 MPa, la resistencia máxima tiene un coeficiente de variación de 7.89% con una media de 11.66 MPa, la resistencia a la fractura tiene un coeficiente de variación de 30.76% con una media de 0.39 MPa y la ductilidad tiene un coeficiente de variación de 16.48% con una media de 2.73 %. Con los valores de la tabla se observó que nuevamente para la resistencia a la fractura existe una mayor dispersión con respecto a los otros resultados, esto se puede explicar, ya que, estas probetas se sometieron bajo las mismas condiciones metódicas usadas en las otras mezclas para su fabricación.

#### **14.2. Prueba con ensayos de flexión**

Para esta prueba se toma el cuerpo de ensayo (probeta) y se fija de manera horizontal a diferencia de la prueba de anterior, para ello se ubica una estructura ajustable con dos soportes metálicos (con una distancia de 60 mm entre ellos) que sostienen horizontalmente la probeta y seguidamente se ajusta la ubicación vertical de otro cuerpo metálico, el cual es el encargado de ejercer cierta fuerza sobre la probeta hasta su fractura como se evidencia en la figura 83.



*Figura 83 Ensayo de flexión en probetas con la Máquina Universal de Ensayos. Fuente: propia.*

De la misma manera que la prueba anterior los datos a obtener de las pruebas de flexión eran Time, Peak Load, Peak Stress, Peak Disp y Peak Strain, de los cuales se identificaban como:

**Time:** Tiempo hasta la ruptura del cuerpo de ensayo (Segundos)

**Peak Load (PL):** Carga Máxima (N)

**Peak Stress (PSS):** Esfuerzo Máximo (MPa)

**Peak Disp (PD):** Pico de Desplazamiento en (mm)

**Peak Strain (PSN):** Porcentaje de deformación Máxima (%)

La finalidad en este ensayo se basa en observar que tanto la probeta puede resistir la carga máxima, ya que, será la fuerza que se aplicará en el centro del cuerpo de prueba hasta su fractura y cuanto más alto sea el valor de la fuerza, indicará más resistencia por parte de la probeta. Esto se puede evidencia gráficamente al observar el pico de la función en la figura 84.

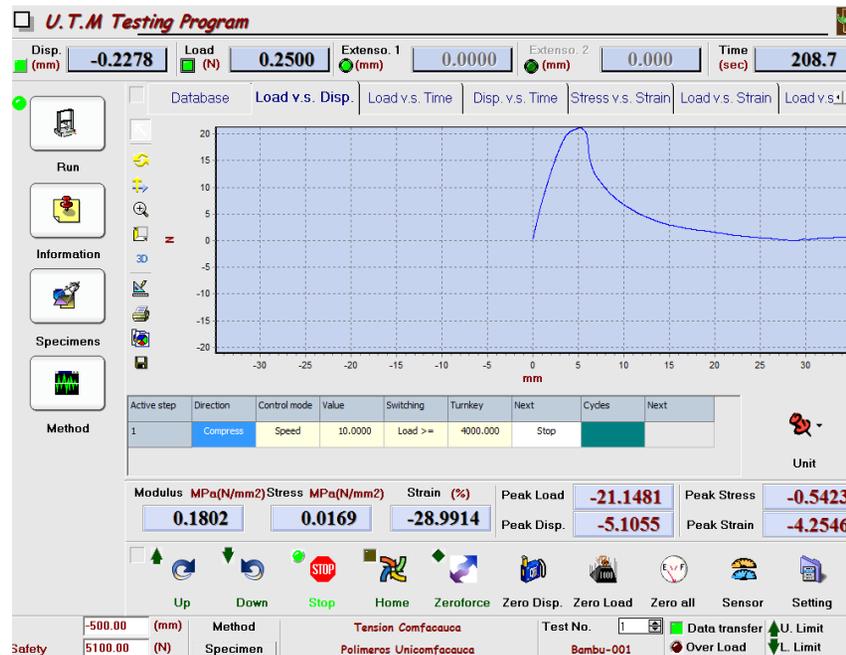


Figura 84 Representación gráfica de un ensayo de Flexión por medio del software. Fuente: propia.

Al igual que la prueba de tracción, para los ensayos de flexión los datos obtenidos de cada una de las 20 probetas clasificada y designadas para esta prueba se organizaron seguidamente de almacenarse en una hoja de archivo de la herramienta Excel, con el fin de representar de la mejor manera la información aportada por la Máquina Universal de Ensayos a través del software como se evidencia en la figura 85.

MEZCLAS DE MATERIAL		Tr	PL	PSS	PD	PSN
A = Azul	A1	40,6	-27,4128	-0,7029	-5,723	-4,7692
AA= Amarillo-Azul	A2	46,7	-31,8142	-0,8157	-6,8912	-5,7427
AM= Azul-Morado	A3	150,9	-21,5622	-0,5529	-4,1208	-3,434
AAM= Amarillo-Azul-Mordado	A4	57,7	-29,7745	-0,7634	-8,0757	-6,7297
	A5	37,4	-26,2013	-0,6718	-5,5728	-4,644
	AA1	250,4	-23,2951	-0,5973	-4,9719	-4,1433
<b>VARIABLES TOMADAS DE LOS ENSAYOS</b>	AA2	208,7	-21,1481	-0,5423	-5,1055	-4,2546
Tr=tiempo de ruptura (segundos)	AA3	202,4	-14,9678	-0,3838	-4,0541	-3,3784
Peak Load = PL = carga máxima (N)	AA4	207,3	-22,2906	-0,5716	-5,5227	-4,6023
Peak Stress = PSS= Esfuerzo Máximo (MPa)	AA5	192,7	-26,1092	-0,6695	-5,723	-4,7692
Peak Displacement= PD= Pico de desplazamiento (mm)	AM1	202,7	-25,5495	-0,6551	-6,7243	-5,6036
Peak Strain = PSN= Porcentaje de deformación máxima (%)	AM2	301	-27,9649	-0,717	-12,1578	-10,1315
	AM3	203,4	-23,3565	-0,5989	-7,0414	-5,8679
	AM4	186	-17,4445	-0,4473	-3,4699	-28916
	AM5	207,2	-24,867	-0,6376	-6,0066	-5,0055
	AAM1	223,5	-23,0727	-0,5916	-6,3071	-5,2559
	AAM2	151,1	-27,9572	-0,7169	-5,7897	-4,8248
	AAM3	200,1	-29,0384	-0,7446	-6,3237	-5,2698
	AAM4	228,8	-31,2774	-0,802	-7,3752	-6,146
	AAM5	174,6	-22,0606	-0,5657	-4,9552	-4,1294

Figura 85 Datos resultantes de los ensayos de Flexión. Fuente: propia.

Como se mencionó anteriormente, para esta prueba de flexión su finalidad es ejercer una carga o fuerza en el centro de la probeta hasta fracturarla, por lo cual mientras mayor sea la carga ejercida indicará que la probeta opuso mayor resistencia para poder fracturarse. En base a esto se pudo observar de acuerdo a la base de datos resultantes que la probeta que opuso mayor resistencia fue la categorizada como A2 con una carga ejercida de 31,8142 N y la segunda en oponer mayor resistencia fue la mezcla categorizada como AAM4 con una carga ejercida sobre esta de 31,2774. En este caso el tiempo no es totalmente relevante, ya que, la fractura puede ocurrir antes, pero las fibras internas del material no permiten una ruptura total y limpia de la probeta como se puede observar en la figura 86.



*Figura 86 Fractura de probeta y visualización de fibras que la mantienen unida después de fracturación.  
Fuente: propia.*

Las tablas 8 a 11 resumen los resultados de los ensayos de flexión de los cuatro tipos de probetas ensayadas.

**Tabla 8** Flexión para probetas A.

Probeta	Modulo Flexión [GPa]	Resistencia máxima [MPa]	Resistencia a la fractura (MPa)	Ductilidad (%)
A1	6.94	0.7	0.76	4.76
A2	7.46	0.81	0.98	5.74
A3	6.92	0.55	1.41	3.43
A4	6.28	0.76	1.12	6.72
A5	6.83	0.67	0.45	4.64
Promedio	6.88	0.69	0.94	5.05
Desviación	0.41	0.099	0.36	1.23

**Tabla 9** Flexión para probetas AA.

Probeta	Modulo Flexión [GPa]	Resistencia máxima [MPa]	Resistencia a la fractura (MPa)	Ductilidad (%)
AA1	8.13	0.59	0.4	4.14
AA2	7.38	0.54	0.66	4.25
AA3	5.05	0.38	1.29	3.37
AA4	5.66	0.57	0.78	4.6
AA5	7.09	0.66	0.03	4.76
Promedio	6.66	0.54	0.63	4.22
Desviación	1.27	0.1	0.46	0.53

**Tabla 10** Flexión para probetas AM.

Probeta	Modulo Flexión [GPa]	Resistencia máxima [MPa]	Resistencia a la fractura (MPa)	Ductilidad (%)
AM1	6.05	0.65	1.24	5.6
AM2	6.17	0.71	4.04	10.13
AM3	6.37	0.59	1.39	5.86
AM4	7.72	0.44	4.07	2.89
AM5	8.39	0.63	0.13	5
Promedio	6.94	0.6	2.17	5.89
Desviación	1.05	0.1	1.78	2.63

**Tabla 11** Flexión para probetas AAM.

Probeta	Modulo Flexión [GPa]	Resistencia máxima [MPa]	Resistencia a la fractura (MPa)	Ductilidad (%)
AAM1	6.31	0.59	0.13	5.25
AAM2	7.34	0.71	0.78	4.82
AAM3	8.19	0.74	1.24	5.26
AAM4	8.97	0.8	3.5	6.14
AAM5	6.48	0.56	0.06	4.12
Promedio	7.45	0.68	1.14	5.11
Desviación	1.13	0.1	1.4	0.73

Al observar las tablas de la 8 a la 11 se puede observar que el valor de los módulos de flexión para las probetas AA (fabricas a partir del PP) se encuentran dentro del rango establecido observado en el estado del arte, donde señala que este módulo se encuentra en entre 0.026 - 10 GPa [66]. Sin embargo, se puede observar que en lo que respecta a las probetas resultantes de las mezclas AA, AM y AAM no se encuentran dentro del rango de flexión establecido en el estado del arte respecto al HDPE (0.28 - 1.16 GPa), lo cual, al ser analizado, se determinó que la razón que podría provocar que el módulo de flexión del HDPE sea mayor al establecido se debería a que las propiedades del PP lo beneficiaron al ser mezclados y sometidos a las mismas condiciones para la fabricación de las probetas compuestas por estos dos polímeros [67]. Aunque, se requieren pruebas de caracterización para corroborar lo mencionado anteriormente, se han evidenciado en el estado del arte ensayos de mezclas del PP con polietileno, las cuales presentan un aumento relativo de los módulos (principalmente el de elasticidad), donde describen que este efecto beneficioso por parte del PP se hace relativamente más notable con el aumento de concentración del polietileno.

De aquí se destacan la probeta A2, elaborada con una la velocidad usada en el motorreductor de 10 Hz, en la cual para esta inyección las temperaturas usadas en las 4 resistencias desde la extrusión hasta la inyección fueron 160 °C, 180 °C, 200 °C y 180 °C (esta última en la resistencia térmica del cilindro de inyección).

Para la probeta AA5, la velocidad usada en el motorreductor de 20 Hz, en la cual

para esta inyección las temperaturas usadas en las 4 resistencias desde la extrusión hasta la inyección fueron 160 °C, 180 °C, 220 °C y 220 °C (esta última en la resistencia térmica del cilindro de inyección).

Para la probeta AM2 se aplicaron en su fabricación los mismos parámetros que posee la probeta AA5.

Para la fabricación de la probeta categorizada AAM4 la velocidad usada en el motorreductor fue de 20 Hz, para esta inyección las temperaturas usadas en las 4 resistencias desde la extrusión hasta la inyección fueron 180 °C, 200 °C, 250 °C y 250°C (esta última en la resistencia térmica del cilindro de inyección).

**Tabla 12** Comparación de los resultados promedio de los ensayos realizados y los reportados en la literatura del PP y PEAD (HDPE) [31].

Material	Resistencia tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Velocidad (mm/min)
A PP-Azul	15.34	7.86	5
AA PP-Azul+PEAD-Amarillo	13.18	6.93	5
AM PP-Azul+PEAD-Morado	11.93	6.54	5
AAM PP-Azul+PEAD-Amarillo+PEAD-Morado	11.66	6.57	5
HDPE Virgen	28	916	50
	21,4	-	5
	10,88	778	2
HDPE Reciclado	17,4	584	50
	23	349,9	-
	23,2	-	5
PP Virgen	38	1746	50
	24,1	500,25	50
	25	600	5
PP Reciclado	30,4	1474	50
	28	580	5

La tabla 12 muestra una comparación entre los resultados promedios de los ensayos

realizados y los valores reportados en la literatura. Se observó que los valores no son cercanos, tanto en la resistencia a la tracción como en el módulo de elasticidad, independientemente de si los materiales comparados en la literatura son vírgenes o reciclados. Esta diferencia puede deberse a varios factores a considerar. En primer lugar, los materiales poliméricos utilizados son reciclados, lo que puede afectar significativamente sus propiedades debido al tipo de tratamiento que reciben para permitir su reutilización. Además, los procesos de extrusión e inyección a los que se somete el material reciclado, con altas temperaturas y tiempos variables, pueden también afectar sus propiedades mecánicas. En conclusión, estos factores influyen notablemente en la degradación de las propiedades mecánicas de los materiales, tal como se reporta en la literatura [68].

## 15. CONCLUSIONES

En las siguientes conclusiones, se presentarán los resultados y hallazgos obtenidos a lo largo del proyecto, así como una evaluación de la eficacia y funcionamiento del sistema de inyección de dos etapas. Así, en general se puede concluir que:

Fue posible llevar a cabo satisfactoriamente el diseño y la implementación de un sistema de inyección de plástico de dos etapas que permita el procesamiento y aprovechamiento del polietileno reciclado.

Se logró desarrollar el prototipo de la máquina siguiendo la metodología de diseño mecatrónico. Esta metodología permitió establecer las variables críticas necesarias para la fabricación de la máquina y determinar los parámetros óptimos para el procesamiento del polietileno, considerando los procesos de extrusión e inyección implementados en el sistema. Además, se identificó que el control de velocidad y temperatura eran condiciones fundamentales para llevar a cabo estos procesos de manera eficiente. Por lo tanto, se enfocó en desarrollar un sistema que permitiera operar ambas variables sin obstáculos que afectaran su control. Con estos parámetros controlados, se logró un prototipo funcional de la máquina, capaz de procesar el polietileno de manera efectiva y controlada. A esto se le atribuye que el tipo de material (acero inoxidable) a usar en la fabricación permitió una eficaz transmisión de calor en las ubicaciones esenciales, además, el diseño de la máquina prototipo también permitió su disipación disminuyendo los riesgos al hacer contacto con la estructura al estar activas las etapas de extrusión e inyección.

Con respecto a los ensayos mecánicos llevados a cabo, se analizó que la mezcla o adición del PP al PEAD puede permitirle al polietileno de alta densidad ser lo suficiente mente flexible para posibilitar su inyección sin ninguna obstrucción, sin embargo, sus propiedades mecánicas pueden degradarse si el PP no se encuentra con el mismo porcentaje de calidad en el que se encuentra el material con el que se dará la mezcla.

Por medio de la aplicación de la espectroscopia RAMAN en las probetas, los ensayos revelaron en menor porcentaje respecto a los 3 materiales poliméricos usados en la inyección otros componentes, concluyendo que, al ser plásticos

reciclados, en el proceso para convertirlos en materiales aprovechables, no solo el PP o el PEAD hicieron parte de la composición de los pellets, también otros compuestos que ya sea por parte de componentes residuales adheridos a estos polímeros cuando son desechados o cuando se realiza la mezcla para el procesamiento y generación de los pellets pueden hacer parte de ello. Con esto se concluyó por qué el match de cada uno de los materiales en los ensayos RAMAN no marcaron el 100% respecto a la similitud química que debía tener el material.

Se destaca que aun cuando los materiales reciclados usados y sometidos para la creación de probetas no se encuentran con sus propiedades al 100% de eficiencia, los resultados obtenidos en su fabricación por medio de la máquina prototipo le otorgan validez para la fabricación de productos útiles y con ello promueven a la reutilización de polímeros reciclados en la ciudad de Popayán.

Con los mejores resultados obtenidos de las probetas (gracias a los ensayos mecánicos), se determinaron los parámetros bajo los cuales cada una fue fabricada, estableciendo que para una fabricación correcta de acuerdo a los materiales usados, las temperaturas (aplicadas a las resistencias) y velocidades (aplicadas al Motoreductor) son: para el PP-Azul se aplicaron temperaturas de 150 °C (R1), 200 °C (R2), 250 °C (R3) y 200 °C (R4) con una velocidad de 20 Hz, para las mezcla de PP-Azul+PEAD-amarillo y también de PP-Azul+PEAD morado se aplicaron temperaturas iguales de 160 °C (R1), 180 °C (R2), 220 °C (R3) y 220 °C (R4) con una misma velocidad de 20 Hz y finalmente para la mezcla del PP-Azul+PEAD-Amarillo+PEAD-Morado se aplicaron temperaturas de 150 °C (R1), 200 °C (R2), 250 °C (R3) y 200 °C (R4) con una velocidad de 20 Hz.

## **16. TRABAJOS FUTUROS**

- Desarrollo de una placa PCB para una mejor organización y optimización del circuito de control que rige el sistema de extrusión e inyección.
- El establecimiento de un sistema neumático o hidráulico automatizado que facilite el proceso de moldeo, ya que, en la máquina prototipo fabricada se lleva a cabo de manera manual el ajuste y extracción del molde, lo que ofrece cierto margen de mejora entorno a la velocidad de producción de las piezas que se fabriquen con la máquina.
- El desarrollo de un molde capaz de producir mejores resultados que los obtenidos en este trabajo con el fin de mejorar la calidad de los productos que se generen a futuro con la máquina fabricada.

## 17. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Gigault *et al.*, “Current opinion: What is a nanoplastic?,” *Environmental Pollution*, vol. 235, pp. 1030–1034, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2018.01.024.
- [2] A. V. Morillas, R. M. Espinosa Valdemar, M. Beltrán Villavicencio, and M. Velasco Pérez, “El reciclaje de los plásticos”.
- [3] M. R. Cobos Vera, “Campaña social de concientización e información basada la ordenanza de regulación de plásticos de un solo uso,” 2020, Accessed: Sep. 24, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/9997>
- [4] Maciej Serda *et al.*, “Caracterización de los residuos sólidos e impactos de las actividades antropogénicas como fuentes generadoras en playas de la costa noroeste del departamento de la Guajira,” *Uniwersytet śląski*, vol. 7, no. 1, pp. 343–354, 2022, doi: 10.2/JQUERY.MIN.JS.
- [5] “La contaminación por plásticos en el océano se cuadruplicará al 2050 | WWF.” <https://www.wwf.org.co/?374510/La-contaminacion-por-plasticos-en-el-oceano-se-cuadruplicara-al-2050> (accessed Oct. 10, 2022).
- [6] I. Acosta-Coley, M. Duran-Izquierdo, E. Rodriguez-Cavallo, J. Mercado-Camargo, D. Mendez-Cuadro, and J. Olivero-Verbel, “Quantification of microplastics along the Caribbean Coastline of Colombia: Pollution profile and biological effects on *Caenorhabditis elegans*,” *Mar Pollut Bull*, vol. 146, pp. 574–583, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.MARPOLBUL.2019.06.084.
- [7] F. Maqbool, S. Mostafalou, H. Bahadar, and M. Abdollahi, “Review of endocrine disorders associated with environmental toxicants and possible involved mechanisms,” *Life Sci*, vol. 145, pp. 265–273, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.LFS.2015.10.022.
- [8] D. Carolina and M. Osorio, “Estudio del manejo de residuos plásticos en colombia”.
- [9] D. MORALES CORTÉS, “Diseño de experimentos para el reciclaje de polietileno a través de la extrusión de filamentos,” 2019. <http://biblio.upmx.mx/tesis/198939.pdf> (accessed Sep. 24, 2022).
- [10] S. M. Turpo Mamani, “Reciclado de plástico (PET) para la elaboración de adoquín mediante el proceso de extrusión,” *Universidad Peruana Unión*, Oct. 2019, Accessed: Sep. 24, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/2116>
- [11] L. Vidal, A. Molina, and G. Duque, “Incremento de la contaminación por microplásticos en aguas superficiales de la bahía de Buenaventura, Pacífico colombiano,” 2021, Accessed: Sep. 13, 2022. [Online]. Available: <https://aquadocs.org/handle/1834/41721>
- [12] M. F. Valderrama Ocoró *et al.*, “Estudio dinámico del reciclaje de envases pet en el Valle del Cauca,” *Rev Lasallista Investig*, vol. 15, no. 1, pp. 67–74, 2018, doi: 10.22507/RLI.V15N1A6.
- [13] C. E. PIÑEROS TRUJILLO and B. S. ACOSTA GUTIERREZ, “Rediseño de una máquina extrusora para reciclaje de plástico producido en la facultad

- tecnológica de la ud,” 2018.  
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/24299/AcostaBryamPinerosCarol2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed Sep. 25, 2022).
- [14] A. E. Navarrete Silva, “Sistema de moldeo a inyección estilo lineal para una extrusora de plástico reciclado.,” Jun. 2013, Accessed: Sep. 25, 2022. [Online]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/3525>
- [15] J. H. MORALES SALGUEIRO, “Diseño de una maquina extrusora de plásticos PET,” 2014.  
<https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/9476/PG-1366-Morales%20Salgueiro%2c%20Jeison%20Humberto.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed Sep. 25, 2022).
- [16] A. P. Acuña Ruiz and M. A. Plasencia Alvarez, “Diseño de una máquina extrusora-inyectora de plásticos de baja densidad.,” 2020, Accessed: Sep. 24, 2022. [Online]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/8046>
- [17] G. Casado Llordén, “Reciclado por extrusión de materiales para impresión 3D,” 2022, Accessed: Sep. 24, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/61750>
- [18] P. Rodriguez and C. Parga, “Desarrollo de un material compuesto biodegradable para los procesos de extrusion e inyeccion,” 2019, Accessed: Sep. 24, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.altecasociacion.org/handle/20.500.13048/1743>
- [19] N. Sánchez Rodríguez, “Economía circular para la gestión y aprovechamiento de residuos sólidos provenientes del sector de la construcción en Bogotá D.C.,” Aug. 2021, Accessed: Sep. 24, 2022. [Online]. Available: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8732>
- [20] J. F. Alenza García, “La economía circular en el derecho ambiental,” 2020, Accessed: Sep. 24, 2022. [Online]. Available: <https://academica-e.unavarra.es/xmlui/handle/2454/39443>
- [21] U. E. N. C. for E. Assessment, “Plastic & health: The hidden costs of a plastic planet,” Mar. 2009.
- [22] Í. del C. P. Anzules and D. W. M. Castro, “Contaminación ambiental,” *RECIMUNDO*, vol. 6, no. 2, pp. 93–103, Mar. 2022, doi: 10.26820/RECIMUNDO/6.(2).ABR.2022.93-103.
- [23] Graziani and Pietro, “Economía circular e innovación tecnológica en residuos sólidos: Oportunidades en América Latina,” *Books*, Accessed: Sep. 19, 2022. [Online]. Available: <https://ideas.repec.org/b/dbl/dblbks/1247.html>
- [24] A. C. García Beltrán and W. S. Yagual Coveña, “La economía circular: aprovechamiento de los polímeros naturales para emprendimientos en tiempo de pandemia en el Cantón Playas-Provincia del Guayas,” 2021, Accessed: Mar. 02, 2023. [Online]. Available: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/58054>
- [25] “Ciencia de los polímeros - Fred W. Billmeyer - Google Libros.” <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=Fe0FEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Pol%C3%ADmeros&ots=e3x0s1ncpl&sig=fC3C73ISsTGHNpq>

- Hiw7E-5gnoCk&redir\_esc=y#v=onepage&q=Pol%C3%ADmeros&f=false (accessed Sep. 19, 2022).
- [26] “Polímeros conductores: Su papel en un desarrollo energético sostenible - Javier Padilla Martínez, Rafael García Valverde, Antonio Jesús Fernández Romero, Urbina Yeregui - Google Libros.”  
[https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=oF8OEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=pol%C3%ADmeros+&ots=RUHZM7zRxs&sig=AQ7JTa5fjZcL6FtPTh8fOndo5DI&redir\\_esc=y#v=onepage&q=pol%C3%ADmeros&f=false](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=oF8OEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=pol%C3%ADmeros+&ots=RUHZM7zRxs&sig=AQ7JTa5fjZcL6FtPTh8fOndo5DI&redir_esc=y#v=onepage&q=pol%C3%ADmeros&f=false) (accessed Sep. 19, 2022).
- [27] T. K. Goswami and S. Mangaraj, “Advances in polymeric materials for modified atmosphere packaging (MAP),” *Multifunctional and Nanoreinforced Polymers for Food Packaging*, pp. 163–242, Jan. 2011, doi: 10.1533/9780857092786.1.163.
- [28] J. P. Greene, “Commodity Plastics,” *Automotive Plastics and Composites*, pp. 83–105, 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-818008-2.00004-0.
- [29] A. M. Rodríguez Jiménez, P. C. Alonso Hernández, N. S. Quintero Ovalle, I. Q. 1010021187, I. Q. 1018513494, and I. Q. 1010009850, “Obtención de material a base de polipropileno para monturas de gafas,” 2021, Accessed: Mar. 02, 2023. [Online]. Available: <https://repository.universidadean.edu.co/handle/10882/11355>
- [30] S. Kumar, E. Singh, R. Mishra, A. Kumar, and S. Caucci, “Utilization of Plastic Wastes for Sustainable Environmental Management: A Review,” *ChemSusChem*, vol. 14, no. 19, pp. 3985–4006, Oct. 2021, doi: 10.1002/CSSC.202101631.
- [31] By Mikell P. Groover, “Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas - Mikell P. Groover - Google Libros.”  
[https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=tcV0l37tUr0C&oi=fnd&pg=PR13&dq=Fundamentos+de+manufactura+moderna:+materiales,+procesos+y+sistemas+By+Mikell+P.+Groover&ots=7\\_SDa69z\\_v&sig=WWNHRJ-oswfbV6jizirm6dyYDcU&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Fundamentos%20de%20manufactura%20moderna%3A%20materiales%2C%20procesos%20y%20sistemas%20By%20Mikell%20P.%20Groover&f=false](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=tcV0l37tUr0C&oi=fnd&pg=PR13&dq=Fundamentos+de+manufactura+moderna:+materiales,+procesos+y+sistemas+By+Mikell+P.+Groover&ots=7_SDa69z_v&sig=WWNHRJ-oswfbV6jizirm6dyYDcU&redir_esc=y#v=onepage&q=Fundamentos%20de%20manufactura%20moderna%3A%20materiales%2C%20procesos%20y%20sistemas%20By%20Mikell%20P.%20Groover&f=false) (accessed Jul. 11, 2023).
- [32] J. A. V. Costa and M. G. de Morais, “An Open Pond System for Microalgal Cultivation,” *Biofuels from Algae*, pp. 1–22, 2013, doi: 10.1016/B978-0-444-59558-4.00001-2.
- [33] R. A. y N. P. Chávez Larrea, “Diseño y construcción de un prototipo de extrusor de doble tornillo (EDT) para fabricación de filamento polimérico con alta carga metálica para impresión 3D mediante tecnología FDM.,” Dec. 07, 2021. <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/28021/1/T-ESPE-018178.pdf> (accessed Sep. 19, 2022).
- [34] J. H. Morales Salgueiro and A. [Tutor] Velarde Forest, “Diseño de una máquina extrusora de plástico PET,” 2014, Accessed: Jan. 28, 2023. [Online]. Available: <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/9476>
- [35] W. Dahmen, T. Gotzen, S. Melian, and S. Müller, “Numerical simulation of

- cooling gas injection using adaptive multiresolution techniques,” *Comput Fluids*, vol. 71, pp. 65–82, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.COMPFLUID.2012.10.003.
- [36] J. A. Lara Ugaz, “Desarrollo de una metodología para evaluar las propiedades mecánicas de componentes de prótesis de miembro superior activadas por muñeca fabricados mediante modelado por deposición fundida,” Sep. 2021, Accessed: Jul. 28, 2023. [Online]. Available: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/20503>
- [37] M. Posada, “Conceptos y aplicaciones”.
- [38] M. I. Mohammed, D. Wilson, E. Gomez-Kervin, L. Rosson, and J. Long, “EcoPrinting: Investigation of Solar Powered Plastic Recycling and Additive Manufacturing for Enhanced Waste Management and Sustainable Manufacturing,” *2018 IEEE Conference on Technologies for Sustainability, SusTech 2018*, Mar. 2019, doi: 10.1109/SUSTECH.2018.8671370.
- [39] T. Hachimi, N. Naboulsi, F. Majid, R. Rhanim, I. Mrani, and H. Rhanim, “Design and Manufacturing of a 3D printer filaments extruder,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 33, no. C, pp. 907–916, 2021, doi: 10.1016/J.PROSTR.2021.10.101.
- [40] A. D. Jácome León, “Estudio de la configuración de fibras del material compuesto de matriz epoxi reforzada con fibra de piña y su incidencia en las propiedades mecánicas en la fabricación de butacas deportivas,” 2015, Accessed: Jul. 28, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/10373>
- [41] “Comportamiento mecánico a tracción del compuesto polietileno de alta densidad y polipropileno reciclado.” <https://confedi.org.ar/wp-content/uploads/2020/12/Articulo4-RADI16.pdf> (accessed Jul. 12, 2023).
- [42] “LDPE Versus HDPE.” <https://www.vem-tooling.com/ldpe-vs-hdpe/> (accessed Jul. 28, 2023).
- [43] P. Colombiano *et al.*, “Cómo citar el artículo Número completo Más información del artículo,” *Revista Politécnica*, vol. 16, pp. 77–84, 2020, doi: 10.33571/rpolitec.v16n31a6.
- [44] “(PDF) The recycling of E-Waste ABS plastics by melt extrusion and 3D printing using solar powered devices as a transformative tool for humanitarian aid.” [https://www.researchgate.net/publication/329216987\\_The\\_recycling\\_of\\_E-Waste\\_ABS\\_plastics\\_by\\_melt\\_extrusion\\_and\\_3D\\_printing\\_using\\_solar\\_powered\\_devices\\_as\\_a\\_transformative\\_tool\\_for\\_humanitarian\\_aid](https://www.researchgate.net/publication/329216987_The_recycling_of_E-Waste_ABS_plastics_by_melt_extrusion_and_3D_printing_using_solar_powered_devices_as_a_transformative_tool_for_humanitarian_aid) (accessed Sep. 19, 2022).
- [45] C. DE Ingeniería Electromecánica, S. Collahuazo Oscar Adrian Uvillus Tipan Gustavo Javier, and I. Msc Héctor Raúl Reinoso Peñaherrera MBA Latacunga -Ecuador, “Universidad técnica de cotopaxi facultad de ciencias de la ingeniería y aplicadas propuesta tecnológica autores ‘construcción de una máquina extrusora para plástico,’” 2019.
- [46] Flores Salazar Leonel Ismael, “Máquina extrusora para reciclaje de plástico,” Jul. 11, 2013.

- <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/3523/1/04%20MEC%2002%20TESIS.pdf> (accessed Sep. 19, 2022).
- [47] J. Joane *et al.*, “Diseño de una extrusora para plásticos.” Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira, 2007. Accessed: Oct. 10, 2022. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11059/1110>
- [48] Á. A. Matias *et al.*, “Use of recycled polypropylene/poly(ethylene terephthalate) blends to manufacture water pipes: An industrial scale study,” *Waste Management*, vol. 101, pp. 250–258, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.WASMAN.2019.10.001.
- [49] W. Geovanny Chicaiza Rivera, M. Morales Paola Janeth, and Y. Zumba Luis Mateo, “Production of Sports T-Shirts from Pet Bottles to Reduce Pollution in the Parish of Nayón, Quito,” *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*, Oct. 2022, doi: 10.18502/epoch.v2i6.12221.
- [50] “PlasticTEX Indumentaria de plástico reciclado”.
- [51] J. Carlos and M. Posada, “Desarrollo de un modelo funcional que permita organizar botellas al interior del refrigerador utilizando plástico reciclado de las carcasas de computador,” 2010.
- [52] K. Q. Nguyen *et al.*, “Recycled, Bio-Based, and Blended Composite Materials for 3D Printing Filament: Pros and Cons—A Review,” *Materials Sciences and Applications*, vol. 14, no. 3, pp. 148–185, Mar. 2023, doi: 10.4236/MSA.2023.143010.
- [53] R. Andres Mendoza Quiroga, J. Fabregas Villegas, and E. M. Buelvas Castro, “Analysis of the value chain of plastic recycling. A case study of the department of Atlantico (Colombia),” Accessed: Jun. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/343599147>
- [54] R. Sell, “Model based mechatronic systems modeling methodology in conceptual design stage,” 2007.
- [55] G. B. Bentónicos, “Mar del plástico: una revisión del plástico en el mar.,” *REV. INVEST. DESARR. PESQ. Nº*, vol. 27, pp. 83–105, 2015, Accessed: Jun. 23, 2023. [Online]. Available: <https://aquadocs.org/handle/1834/10964>
- [56] R. N. PARRA BRITO, “Diseño de extrusora de filamento para impresión 3d a partir de plásticos reciclados.,” Aug. 2017. <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/40932/3560902038562UTF SM.pdf?seque> (accessed Mar. 04, 2023).
- [57] “Fuerza de rozamiento. Coeficiente de arrastre.” <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/fluidos/reynolds/reynolds.html> (accessed Mar. 04, 2023).
- [58] “▷ Volumen de un tronco de pirámide (ejemplo y calculadora).” <https://www.areasyvolumenes.net/volumen-de-un-tronco-de-piramide/> (accessed Mar. 04, 2023).
- [59] J. S. Candela Herrán and L. L. Lozano Cortés, “Caracterización de un sistema de combustión a base de pellets de borra de café para la operación de la caldera pirotubular didáctica de la Fundación Universidad de América.,” Feb. 2022, Accessed: Mar. 25, 2023. [Online]. Available: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8858>

- [60] C. A. Ararat and E. A. Murillo, "Polietileno de baja densidad funcionalizado con un poliéster polioliol altamente ramificado maleinizado," *Ing Cienc*, vol. 12, no. 23, pp. 127–144, Feb. 2016, doi: 10.17230/INGCIENCIA.12.23.7.
- [61] "MatWeb - The Online Materials Information Resource."  
<https://www.matweb.com/errorUser.aspx?msgid=2&ckck=nocheck> (accessed Jul. 29, 2023).
- [62] "Overview of materials for Polypropylene, Molded."  
<https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=08fb0f47ef7e454fbf7092517b2264b2&ckck=1> (accessed Jul. 29, 2023).
- [63] "Certificado de responsabilidad y autoría autoría del trabajo de titulación titulación."
- [64] M. Valero Rodríguez, "Diseño y cálculo de un reductor de velocidad con relación de transmisión 31,5 y par máximo a la salida de 2730 Nm," Oct. 2021, Accessed: Jul. 18, 2023. [Online]. Available:  
<https://riunet.upv.es/handle/10251/173703>
- [65] J. A. Fabián Anguiano, "Membranas bifásicas (Ce<sub>0.9</sub>Pr<sub>0.1</sub>O<sub>2-δ</sub> / Pr<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>Fe<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5</sub>O<sub>3-δ</sub>)-Carbonato para la separación selectiva de CO<sub>2</sub>," Nov. 2018, Accessed: Jul. 28, 2023. [Online]. Available:  
<http://tesis.ipn.mx/xmlui/handle/123456789/26239>
- [66] "Overview of materials for Polypropylene, Molded."  
<https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=08fb0f47ef7e454fbf7092517b2264b2&ckck=1> (accessed Jul. 30, 2023).
- [67] "Overview of materials for High Density Polyethylene (HDPE), Injection Molded."  
<https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=fce23f90005d4f8e8e12a1bce53ebdc8&ckck=1> (accessed Jul. 30, 2023).
- [68] "Propiedades termo-mecánicas del Polipropileno: Efectos durante el reprocesamiento."  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-77432017000300245](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432017000300245) (accessed Jul. 29, 2023).