



**Diseño construcción y evaluación de un sistema de manufactura aditiva con
microextrusión de polímero PET reciclado**

Lima Salazar, Karen Mishel y Zárate Herrería, Jorge Leandro

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Echeverría Yáñez, Jaime Fernando

08 de febrero del 2022

DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE...

Scanned on: 14:32 February 8, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	194
Words with Minor Changes	72
Paraphrased Words	363
Ommited Words	0



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, “**Diseño, construcción y evaluación de un sistema de manufactura aditiva con microextrusión de polímero PET reciclado**” fue realizado por la señorita **Lima Salazar Karen Mishel** y el señor **Zárate Herrería Jorge Leandro** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 08 de febrero de 2022

.....
Ing. Echeverría Yánez Jaime Fernando, Mgtr

C. C. 1709180713



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

Responsabilidad de autoría

Nosotros, **Lima Salazar, Karen Mishel y Zárate Herrería, Jorge Leandro**, con cédulas de ciudadanía N°1718428699 y N°1721439139 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño, construcción y evaluación de un sistema de manufactura aditiva con microextrusión de polímero PET reciclado** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 08 de febrero de 2022

Lima Salazar Karen Mishel

C.C.:1718428699

Zárate Herrería Jorge Leandro

C.C.:1721439139



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

Autorización de publicación

Nosotros, **Lima Salazar, Karen Mishel y Zárate Herrería, Jorge Leandro**, con cédulas de ciudadanía N°1718428699 y N° 1721439139 autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño, construcción y evaluación de un sistema de manufactura aditiva con microextrusión de polímero PET reciclado** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 08 de febrero de 2022

Lima Salazar Karen Mishel

C.C.:1718428699

Zárate Herrería Jorge Leandro

C.C.:1721439139

Dedicatoria

El trabajo de titulación que hemos realizado lo dedicamos a nuestras familias que siempre supieron apoyarnos darnos un consejo sabio para salir adelante, nos formaron con sus enseñanzas para ser buenas personas, con dedicación y luego de un arduo trabajo se ha llegado al objetivo, un día nos atrevimos a soñar y hoy vemos nuestra meta alcanzada.

Karen Mishel y Jorge Leandro

Esta meta también le dedico a mi novia Jeniffer por el constante apoyo durante todo el proceso de conseguir el objetivo.

Jorge Leandro Zárate Herrería

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por ser el apoyo y la fortaleza en momentos de debilidad y gran dificultad en todo nuestro trayecto académico. A nuestros padres por ser los promotores de nuestros sueños y creer en nuestras expectativas. A nuestros hermanos y hermanas por su amor, cuidado y paciencia para mantenernos en este camino. Queremos dar las gracias a nuestros compañeros y compañeras de la universidad que se convirtieron en nuestros amigos y recorrieron este camino con nosotros brindándonos anécdotas que llevaremos en nuestros corazones, también queremos agradecer a nuestros docentes quienes nos brindaron sus conocimientos que ahora se ven reflejados en este trabajo, agradecer a nuestro director de tesis Ing. Jaime Echeverría, Mgtr por sabernos guiar y encaminar para poder realizar nuestro proyecto y cumplir los objetivos del mismo.

Gracias a todas las personas que nos supieron brindar su apoyo durante el desarrollo de nuestro proyecto hubo obstáculos que pudimos vencer, aprendimos muchas lecciones en el camino que ahora aplicaremos en el futuro.

Karen Mishel y Jorge Leandro

Índice

Certificación	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimientos.....	7
Índice	8
Índice de tablas	13
Índice de figuras.....	16
Resumen.....	20
Abstract.....	21
Capítulo I.....	22
Generalidades	22
Antecedentes	22
Planteamiento del Problema.....	27
Justificación e importancia.....	29
Objetivos	29
Objetivo general	29
Objetivos específicos	29
Alcance	30
Estructura del documento.....	32

Capítulo II.....	33
Estado del arte.....	33
Impresión 3D	33
Métodos o tecnologías de impresión 3D	34
Modelado por deposición de material fundido (FDM)	35
Fotopolimerización- estereolitografía (SLA).....	36
Sinterizado selectivo por láser (SLS).....	38
Fabricación por corte y laminado (LOM).....	39
Tipos de plásticos utilizados en la impresión 3D	40
Tratamiento de polímeros	42
Reciclaje de los polímeros.....	42
Reciclaje primario.....	42
Reciclaje secundario	43
Reciclaje terciario.....	43
Reciclaje cuaternario.....	43
Clasificación de los polímeros.....	43
Tereftalato de Polietileno (PET, PETE)	44
Procesamiento de los polímeros.....	46
Termoformado.....	46
Soplado.....	47
Inyección.....	48

	10
Extrusión	49
Propiedades térmicas de los polímeros	50
Punto de transición vítrea (Tg)	51
Temperatura de fusión (Tm)	51
Temperatura de transición vítrea y fusión de los polímeros	53
Síntesis.....	54
Capítulo III.....	56
Diseño.....	56
Diseño de un sistema de manufactura aditiva con micro-extrusión de polímero PET reciclado...56	
Matriz de la calidad.....	56
Definición de necesidades	56
Definición de características técnicas	57
QFD.....	57
Factibilidad y planeación.....	60
Estructura funcional.....	60
Sistema 1. Estructura de la impresora 3D.....	62
Dimensionamiento del eje Y	63
Sistema 2: Diseño Sistema Mecánico.....	76
Modelado de la estructura de la impresora 3D	76
Sistema 3: Sistema de procesamiento de polímeros	88
Selección de Tornillo sin Fin.....	89

Modelado del extrusor.....	96
Análisis estático de las piezas críticas en el extrusor	99
Sistema 4: Sistema de Potencia.....	100
Selección de Motor para el eje X.....	100
Selección de Motor para el eje Y.....	103
Selección de Motor para el eje Z.....	105
Selección de Motor para el extrusor	107
Selección de Motores para los ejes de movimiento	110
Sistema 5. Control del Sistema.....	110
Tipo de microcontrolador.....	111
Elección del LCD.....	113
Elección de la cama caliente (Heat Bed)	114
Elección de sensores de temperatura	115
Elección de la Fuente de Energía.....	116
Aplicación de Softwares para control.....	117
Descripción del Software generador del código G e interfaz gráfica para la PC (Repetier host 2.2).....	123
Accionamiento de los actuadores mediante la interfaz gráfica.....	127
Visualización 3D y características de las piezas a imprimir.	127
Concepto Final.....	131
Construcción e Implementación.....	131

Construcción de la base	132
Construcción y ensamblaje del bastidor del robot manipulador	133
Implementación del sistema de Extrusión de PET reciclado	138
Calibración	139
Calibración del Extrusor de PET reciclado	140
Pruebas y resultados.....	141
Pruebas.....	141
Alcances y Limitaciones.....	150
Capítulo IV	151
Conclusiones	151
Recomendaciones:.....	151
Trabajos futuros	152
Bibliografía	153
Anexos	160

Índice de tablas

Tabla 1 Ventajas y desventajas de la tecnología FDM	36
Tabla 2 Ventajas y desventajas de la Tecnología SLA	37
Tabla 3 Ventajas y desventajas de la tecnología SLS	39
Tabla 4 Ventajas y desventajas de la tecnología LOM	40
Tabla 5 Temperaturas de transición vítrea y fusión de polímeros	53
Tabla 6 <i>Requerimientos o necesidades del usuario</i>	57
Tabla 7 <i>Especificaciones técnicas del proyecto</i>	57
Tabla 8 <i>Escala japonesa de correlación entre requerimientos</i>	58
Tabla 9 <i>Resultados de la matriz QFD</i>	59
Tabla 10 <i>Sistemas definidos para el diseño</i>	60
Tabla 11 <i>Parámetros requeridos en la estructura de la impresora 3D</i>	62
Tabla 12 <i>Criterios de evaluación para el sistema de transmisión de movimiento eje Y y su ponderación respectiva</i>	68
Tabla 13 <i>Ponderación de costos para las alternativas del sistema de transmisión de movimiento eje Y</i>	68
Tabla 14 <i>Ponderación de peso para las alternativas del sistema de transmisión de movimiento eje Y</i>	69
Tabla 15 <i>Ponderación de movilidad para las alternativas del sistema de transmisión de movimiento eje Y</i>	69
Tabla 16 <i>Alternativas de implementación del sistema de transmisión de movimiento eje Y</i>	70
Tabla 17 <i>Deducción en la selección de diseño para el material del sistema de transmisión de movimiento eje Y</i>	70
Tabla 18 <i>Ponderación de criterios de evaluación para el actuador a utilizar en eje Y</i> ...74	74

Tabla 19	<i>Ponderación de costos para las alternativas del actuador a utilizar en eje Y.</i>	74
Tabla 20	<i>Ponderación de peso para las alternativas del actuador a utilizar en eje Y.</i>	75
Tabla 21	<i>Ponderación de movilidad para las alternativas del actuador a utilizar en eje Y.</i>	75
Tabla 22	<i>Ponderación de implementación para las alternativas del actuador a utilizar en eje Y.</i>	75
Tabla 23	<i>Conclusión en la selección de diseño para el material del sistema de transmisión de movimiento eje Y.</i>	76
Tabla 24	<i>Tipos de hélices. Fuente: (Rodríguez Galbarro, 2021).</i>	89
Tabla 25	<i>Especificaciones del tornillo sin fin.</i>	92
Tabla 26	<i>Alternativas de material para el eje roscado tipo hélice.</i>	93
Tabla 27	<i>Ponderación de criterios de evaluación para el material del eje roscado tipo hélice.</i>	94
Tabla 28	<i>Ponderación de costos para las alternativas del material del eje roscado tipo hélice.</i>	95
Tabla 29	<i>Ponderación de peso para las alternativas del material del eje roscado tipo hélice.</i>	95
Tabla 30	<i>Ponderación de maquinabilidad para las alternativas del material del eje roscado tipo hélice.</i>	95
Tabla 31	<i>Consideración de la aplicación de materiales alternativos de eje torcido con helix.</i>	96
Tabla 32	<i>Consecuencia de un diseño para el material del manipulador.</i>	96
Tabla 33	<i>Elementos que conforman el extrusor.</i>	96
Tabla 34	<i>Análisis estático de los elementos de la impresora.</i>	99
Tabla 35	<i>Características Técnicas de los motores requeridos y los motores elegidos.</i>	110
Tabla 36	<i>Los requerimientos para el microcontrolador.</i>	111

Tabla 37 Características técnicas de algunas tarjetas de control comerciales.....	111
Tabla 38 <i>Especificaciones de las probetas impresas</i>	142
Tabla 39 <i>Mediciones y errores de las probetas de prueba</i>	143
Tabla 40 <i>Parámetros mecánicos de las probetas con 25% de relleno</i>	145
Tabla 41 <i>Parámetros mecánicos de las probetas con 50% de relleno</i>	146
Tabla 42 <i>Parámetros mecánicos de las probetas con 75% de relleno</i>	147
Tabla 43 <i>Parámetros mecánicos de las probetas con 100% de relleno</i>	148
Tabla 44 Características de PET con las que se hicieron pruebas de impresión	149

Índice de figuras

Figura 1 <i>Aaron Rowley</i>	23
Figura 2 <i>Stratasys Objet30 Prime</i>	24
Figura 3 <i>CJP x60 de 3D Systems</i>	24
Figura 4 <i>Impresora de polímero hidrofílico</i>	25
Figura 5 <i>Máquina extrusora</i>	26
Figura 6 <i>Prototipo extrusor de material PET reciclado</i>	27
Figura 7 <i>Producción de plástico en el mundo</i>	28
Figura 8 <i>Impresora de polímero PET reciclado</i>	31
Figura 9 <i>Impresora 3D “The In-Space Refabricator” diseñada por la NASA</i>	34
Figura 10 <i>Tecnología FDM para la impresión 3D</i>	35
Figura 11 <i>Tecnología SLA para impresión 3D</i>	37
Figura 12 <i>Tecnología SLS para impresión 3D</i>	38
Figura 13 <i>Tecnología LOM para la impresión 3D</i>	39
Figura 14 <i>Clasificación numérica de los tipos de plásticos-Tipos de plásticos de acuerdo a su clasificación numérica</i>	44
Figura 15 <i>Etapas para el reciclaje de los plásticos PET</i>	45
Figura 16 <i>Etapas del proceso de termoformado</i>	47
Figura 17 <i>Etapas del proceso de soplado</i>	48
Figura 18 <i>Partes de una máquina inyectora de plástico</i>	49
Figura 19 <i>Esquema de una extrusora de tornillo simple</i>	50
Figura 20 <i>Volumen específico vs temperatura</i>	52
Figura 21 <i>Conducta de los polímeros vs la temperatura</i>	53
Figura 22 <i>Matriz QFD del proyecto</i>	58
Figura 23 <i>Concepción para una impresora 3D de PET</i>	62

Figura 24	<i>Subsistemas de la impresora 3D</i>	63
Figura 25	<i>Transmisión tornillo sin fin – tuerca</i>	65
Figura 26	<i>Transmisión tornillo piñón – correa dentada</i>	66
Figura 27	<i>Transmisión polea – banda plana</i>	67
Figura 28	<i>Motor a pasos NEMA 17</i>	71
Figura 29	<i>Servomotor industrial</i>	72
Figura 30	<i>Motor DC</i>	73
Figura 31	<i>Base del Robot Manipulador</i>	77
Figura 32	<i>Diagrama de cargas en la estructura de la base</i>	77
Figura 33	<i>Reacciones y momentos en el plano y-z</i>	78
Figura 34	<i>Diagrama de cargas en la estructura base plano x-z</i>	78
Figura 35	<i>Reacciones y momentos en el plano y-z</i>	79
Figura 36	<i>Características del perfil seleccionado para la estructura de la impresora 3D</i>	81
Figura 37	<i>Subsistema de referencia eje X</i>	82
Figura 38	<i>Subsistema de referencia eje Y</i>	83
Figura 39	<i>Diagramas de cuerpo libre de las fuerzas aplicadas</i>	84
Figura 40	<i>Diagrama de momento flector del eje en dirección Y</i>	85
Figura 41	<i>Diagrama de fuerzas en el eje Z</i>	87
Figura 42	<i>Eje roscado helicoidal continuo</i>	93
Figura 43	<i>Extrusor para material PET reciclado</i>	99
Figura 44	<i>Dimensiones para correas de perfil trapezoidal según normas ISO</i>	101
Figura 45	<i>Fuerza del motor aplicada para mover el eje Y</i>	104
Figura 46	<i>Fuerza del motor aplicada para mover el eje Y</i>	106
Figura 47	<i>Motor Nema 17 tipos y tamaños</i>	110
Figura 48	<i>Pantalla LCD SLCD1284</i>	113

Figura 49	<i>Camas con calefacción de alta temperatura</i>	115
Figura 50	<i>Perilla de nivelación de plataforma</i>	115
Figura 51	Sensor NTC 100Kohms	116
Figura 52	<i>Fuente de alimentación Maxwell LRS-350</i>	117
Figura 53	<i>Firmware inicial como parámetros default</i>	118
Figura 54	Pasos por milímetro de todos los ejes mostrados en la pantalla LCD	120
Figura 55	<i>Carga del firmware a la tarjeta creality 3D</i>	121
Figura 56	<i>Software para sintonizar el PID de una impresora 3D</i>	122
Figura 57	<i>Calentamiento del extrusor con control PID</i>	123
Figura 58	<i>Conexión serial de la tarjeta a la PC</i>	124
Figura 59	<i>Ajustes para el movimiento manual de la Impresora 3D</i>	125
Figura 60	<i>Determinación de los valores del área útil de impresión</i>	125
Figura 61	<i>Parámetros de velocidad para la generación del código G</i>	126
Figura 62	<i>Parámetros del filamento a usarse para imprimir</i>	126
Figura 63	<i>Mando para el control manual de la impresora</i>	127
Figura 64	<i>Ventana vista de objeto</i>	128
Figura 65	<i>Ventana para la generación del Código G</i>	129
Figura 66	<i>Ventana para imprimir o guardar el código G generado</i>	130
Figura 67	<i>Impresión de piezas de prueba</i>	130
Figura 68	<i>Concepto final sistema de impresión de polímero PET reciclado</i>	131
Figura 69	<i>Soldado de los perfiles para conformar la estructura base</i>	132
Figura 70	<i>Pieza generada el código G para imprimirla en 3D</i>	133
Figura 71	<i>Impresión de las piezas base en impresora 3D</i>	133
Figura 72	<i>Identificación de piezas</i>	134
Figura 73	<i>Preparación de la plataforma soporte de aluminio</i>	134
Figura 74	<i>Perfil de aluminio como eslabón</i>	135

<i>Figura 75</i>	<i>Construcción de la base soporte de la plataforma eje Y</i>	135
<i>Figura 76</i>	<i>Manipulador realizado en corte láser</i>	136
<i>Figura 77</i>	<i>Conexión del motor al eje principal</i>	136
<i>Figura 78</i>	<i>Fijación del eje roscado a la base del extrusor</i>	137
<i>Figura 79</i>	<i>Montaje de los sensores y la niquelina junto a la boquilla del extrusor</i>	137
<i>Figura 80</i>	<i>Implementación de ventiladores en el extrusor</i>	138
<i>Figura 81</i>	<i>Extrusor de polímero PET reciclado</i>	138
<i>Figura 82</i>	<i>Pruebas de movimiento en el eje X</i>	139
<i>Figura 83</i>	<i>Calibración de la cama de la impresora 3D con extrusor</i>	139
<i>Figura 84</i>	<i>Calibración del Extrusor</i>	140
<i>Figura 85</i>	<i>Pruebas de calibración</i>	140
<i>Figura 86</i>	<i>Probeta para las pruebas de impresión</i>	141
<i>Figura 87</i>	<i>Obtención del código G para la probeta de prueba</i>	142
<i>Figura 88</i>	<i>Medición de las probetas a) Altura b) Ancho c) Largo</i>	143
<i>Figura 89</i>	<i>Máquina de ensayos universales</i>	144
<i>Figura 90</i>	<i>Probeta de prueba a 25% de relleno</i>	145
<i>Figura 91</i>	<i>Probeta de prueba a 50% de relleno</i>	146
<i>Figura 92</i>	<i>Probeta de prueba a 75% de relleno</i>	147
<i>Figura 93</i>	<i>Probeta de prueba a 100% de relleno</i>	148

Resumen

La impresora 3d para plástico PET reciclado se construye siguiendo las especificaciones iniciales del diseño CAD, en donde se ensambla la estructura de forma modular para obtener independencia de ciertas partes para modificaciones. Se imprimen las diferentes partes del extrusor para PET reciclado, a continuación, se realizan pruebas en vacío del sistema de transporte de gránulos.

Una vez probado el extrusor de manera preliminar, se procede a ensamblar completamente todas las partes y sistemas de enfriamiento para montarlo en la estructura principal. Se realiza el corte laser de las partes de la caja de control, en donde se colocarán toda la electrónica, fuente de alimentación y pantalla de visualización para el usuario. Se acopla los motores correspondientes de cada eje de movimiento ajustando su posición orientándolas a los ejes correspondientes.

Se coloca los sensores de fin de carrera correspondientes a los 3 ejes de posicionamiento cuyas posiciones son los puntos de origen que tendrá la boquilla del extrusor. Se calibra la cama correspondiente a la plataforma paralela al plano XY de forma manual siguiendo ciertos pasos específicos. Se realizarán pruebas en la impresora para analizar su precisión, su repetitividad y su capacidad de carga. Se hacen pruebas de la máquina en cuanto a los movimientos en los 3 ejes para calibrar su avance en longitudes específicas.

PALABRAS CLAVE:

- **EXTRUSOR**
- **PET**
- **IMPRESIÓN 3D**

Abstract

Once information has been collected on the needs of the user, it can be captured at a technical level with clear specifications on the desired final design. The alternatives to various parts of the system in terms of materials are analysed, including mechanisms suitable for printing recycled PET material.

In order to meet the technical requirements, it is necessary to divide the concept into systems that allow us to differentiate it by specific functions that, by merging them, are synergistically complemented for the proper functioning of the object collection system. For the project, the systems are developed: 1) Structure of the 3D printer. 2) Mechanical System. 3) Polymer Processing System. 4) Power System. 5) Control System.

The above systems are used to achieve the best operation and accuracy option, thus achieving a correlation between them. To obtain the best solution, the prioritisation matrix is used. Once the best options are obtained, the elements that make up the machine are designed, bearing in mind that they must be modular for easy assembly and maintenance.

The maximum powers of the actuators are calculated, whose values depend on the speed that the manufacturer of 3D printers recommends for optimal operation. Once the mechanical and electrical system is ready, a card is chosen according to the requirements that the machine needs to function properly.

KEYWORDS:

- **EXTRUDER**
- **PET**
- **3D PRINT**

Capítulo I

Generalidades

Introducción

En el presente proyecto se escribe la razón para el desarrollo de un sistema de manufactura aditiva con micro-extrusión de polímero PET reciclado. El problema es considerado resaltando su respectiva solución. Para ello, se planifica el análisis de la estructura y el extrusor adecuado para la impresión 3D de polímeros reciclados, y proceder a acondicionar los actuadores y sensores de acuerdo a ello se establece el objetivo principal junto a los objetivos específicos y de esta manera se puede establecer el alcance del proyecto.

Antecedentes

La modelización por deposición fusionada (FDM) es una tecnología de impresión 3D que implica calentar un material sólido a una temperatura de fusión, lo que lo transforma en un fluido que puede colocarse capa por capa. Después de aplicar cada capa, el material se solidifica para permitir la aplicación de la siguiente, formando un objeto 3D.,Figura 1. En el ámbito de impresoras con la capacidad de utilizar materiales diferentes a nivel mundial tenemos algunos casos que se describen a continuación.

A nivel internacional en Bangkok (Phunopas, 2016)Karen Antorvez experta en tecnología 3D de la empresa Trimaker, explica que con la impresión 3D se extienden las posibilidades de la expansión de aplicaciones en el mundo de la alta costura como, por ejemplo, Electroloom Figura 1, un proyecto en el cual se desarrolla la creación de telas no tejidas utilizando polímero de nylon, lo cual permite obtener estructuras complejas y únicas. La idea es que cualquier persona pueda diseñar y obtener su propia ropa.

Figura 1

Aaron Rowley



Fuente: (Phunopas, 2016)

La MJ es un método de impresión donde se inyecta gotas finas de fotopolímero líquido en la bandeja de construcción de manera continua o en goteo en demanda. El proceso es parecido a una impresora. De inyección de tinta que rocía tinta sobre papel para imprimir. Varios cabezales de impresión inyectan material simultáneamente para crear capas, que fraguan instantáneamente por efecto de una bombilla de luz UV conectada al extrusor junto con la boquilla. (Technology, 2012)

Al imprimir con técnicas MJ, hay que tener en cuenta algunas consideraciones de diseño, como un grosor mínimo de 0,5 mm y 1 mm de grosor en las paredes sin soporte. Figura 2.

En el proceso llamado MJ se puede utilizar polímeros de diferentes propiedades físicas y colores además que se puede imprimir el ensamblaje completo evitando así la necesidad de imprimir piezas independientes, finalmente a través del proceso ya mencionado se obtiene un acabado superficial uniforme.

Figura 2

Stratasys Objet30 Prime



Fuente: (Technology, 2012)

Inyección de aglutinante es un proceso de impresión 3D utilizando diversos materiales como nylon, termoplástico, cerámica se rocía delicadamente el material líquido para juntar partículas de polvo y generar una pieza en 3D. Esta máquina cuenta con un alimentador cuyo material está en polvo, un rodillo o pala para recoger el polvo de la cámara y una boquilla para rociar selectivamente el aglutinante a través de un corte transversal fino de polvo. Para continuar con el proceso continuo al terminar una capa la plataforma es atravesada por un rodillo que segrega una cantidad específica de material en polvo es así que con el transcurso del tiempo se forma una pieza. Figura 3

Figura 3

CJP x60 de 3D Systems



Fuente: (Technology, 2012)

Se menciona con su cita respectiva trabajos previos realizados por Navarete y Paucar (2018).

La máquina es un prototipo que es capaz de extruir un tipo de polímero hidrofílico. Cuenta con un husillo prefabricado que permite imprimir en 3d a una temperatura de 25 °C lo cual garantiza que las células no recibirán daño térmico durante la creación de la pieza en 3D. Figura 3.

Figura 4

Impresora de polímero hidrofílico



Fuente: (Navarrete Socasi & Paucar Bastidas, 2018)

- Diseño y construcción de una maquina extrusora de filamentos de 1.75mm y 3mm de diámetro para impresoras 3D, a partir de polímero reciclado. (Ortiza Abata, 2018)

El prototipo es una maquina extrusora de filamentos de 1.75mm y 3mm para impresoras 3D, capaz de trabajar a una velocidad de 10cm/min, cuyo resultado es la obtención de filamento de mayores tolerancias que filamentos comerciales. Figura 4

El material obtenido no garantiza una apropiada impresión 3d común, ya que el mismo contiene residuos no plásticos como fibra de vidrio.

Figura 5*Máquina extrusora*

Fuente: (Ortiza Abata, 2018)

Prototipado de una máquina extrusora de filamento plástico PET para una impresora 3D, a través de una herramienta de diseño y simulación CAD. (Lopez Acurio, 2018)

El prototipo cuenta con un sistema de alimentación de polímero el cual permite utilizar materia prima pellet PET reciclado, para la fabricación del filamento se realiza un proceso de termoformación, con el cual se prevee imprimir piezas en 3D. Figura 5.

El proceso inicia con la materia prima que se encuentra de forma de granulada puesto en un contenedor el cuál alimenta constantemente a un husillo que empuja y permite el flujo del material generando una presión mecánica, además, de un sistema de resistencias “calefacción” que eleva la temperatura, cuyo objetivo es pasar el material fundido a través de una boquilla colocada en el extremo del husillo.

Figura 6

Prototipo extrusor de material PET reciclado.



Fuente: (Lopez Acurio, 2018)

Planteamiento del Problema

Debido a la gran producción de plástico en el mundo según informe de PlasticsEurope, Plastics the facts 2018, publicado en el mes de septiembre.

Plastic Europe presentó el informe Plastics the facts 2018 con los porcentajes de producción de plástico de cada continente, se indica que Asia concentra el 50.1%, le sigue Europa con el 18.5% en tercer lugar se encuentra México, EE. UU y Canadá conocidos como NAFTA con el 17.7% a continuación Medio Oriente y ÁFRICA CON EL 7.1% seguido de Latinoamérica con el 4% Finalmente la Comunidad de Estados Independientes con el 2.6%.

Por tal motivo se ve una alternativa en la utilización de pellets para la impresión 3D, los pellets de plástico son gránulos llamados también nurdles que son piezas muy pequeñas y compactas en forma de cuentas, son de plástico posteriormente se funden y se encuentran presentes en los productos plásticos que vemos en el día a día desde una funda plástica proveniente de una máquina de extrusión de película hasta tarrinas de mantequilla que se obtiene de máquinas de moldeo por inyección.

Los filamentos para impresión 3D provienen de gránulos que se vuelven a fundir y se vuelven a extruir, durante el proceso se pueden agregar varios compuestos para mejorar las propiedades de la resina plástica fundida estos compuestos varían desde tintes simples para cambiar el color del filamento o se puede agregar partículas de madera o fibras de carbono para crear filamentos compuestos, los filamentos siempre comenzarán desde su forma más básica como son los gránulos de ABS o PLA. (Statista)

Figura 7

Producción de plástico en el mundo



Fuente: (statista.com 2018)

Construir un prototipo de impresora 3D cuya característica principal consiste en incorporar una tolva en la cual se ingrese PET reciclado de botellas, la tolva tendrá una extrusora es así que el material ingresado pasa por una cámara que al calentarse derretirá la resina y este líquido pasará a un tornillo sin fin que al girar sacará un filamento delgado con el cual se iniciará el proceso de impresión.

Este proyecto permitirá a los estudiantes y profesores de la Universidad de las Fuerzas

Armadas "ESPE" mejorar su conocimiento de esta tecnología incorporando la máquina como material didáctico para las prácticas en el laboratorio de mecanismos.

Justificación e importancia

La Impresora 3D de nuestro proyecto tiene fines educativos y su área de influencia es la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE enfocado en sus estudiantes y docentes. Se pretende fortalecer los conocimientos, así como el uso y práctica de programación mediante sistemas CAD para el diseño de piezas, en materiales que se puedan imprimir.

En el proyecto de impresión 3d se puede continuar con una investigación de la impresión 3D utilizando diversos tipos de materiales reciclados para la creación de piezas, objetos y además el mejoramiento continuo como en el caso del extrusor como un sistema de alimentación automatizado de gránulos de polímero.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar, construir y evaluar un sistema de manufactura aditiva con micro-extrusión de polímero PET reciclado.

Objetivos específicos

- Caracterizar polímero PET reciclado para ser usado en un sistema de impresión con micro-extrusión.
- Diseñar y construir los elementos estructurales para soportar los elementos de la impresora.
- Diseñar e implementar el sistema eléctrico/electrónico y de control para el sistema de manufactura aditiva con micro-extrusión.
- Realizar pruebas de calibración de la máquina de impresión 3D

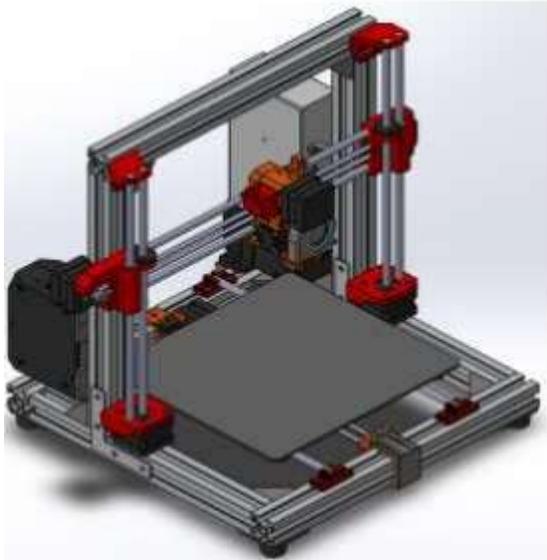
- Evaluar las características de fabricación a través de pruebas de metrología.
- Evaluar los parámetros de proceso versus las propiedades mecánicas del material a través de ASTM-D3039.

Alcance

El diseño de la impresora pretende receptor polímeros PET en forma granulada y polímeros reciclados de igual manera granulados, con el fin de incentivar el reciclaje y de esta manera poder darle un uso adecuado al plástico y a los residuos de las impresiones en 3D tales como soportes que después son desechados. Figura 8

Para la elaboración del prototipo de impresora 3D la materia prima es el PET material del que están hechas las botellas que utilizan en el diario vivir y que por lo general son utilizadas una sola vez, para el proyecto se diseñará:

- Sistema Extrusor
- Sistema de temperatura
- Sistema de refrigeración
- Sistema de tres ejes
- Sistema de controladores
- HMI

Figura 8*Impresora de polímero PET reciclado*

Siendo la temperatura un factor importante y necesario para el proceso de impresión 3D, se planea la colocación de un sensor de temperatura, que permita conocer si la temperatura es la adecuada para poder fundir el plástico ingresado y permitir que el proceso de impresión sea el más óptimo en su resultado, adicionalmente unos fines de carrera para los actuadores que se desplazaran en el área de impresión.

La característica más importante del proyecto es la tolva junto con un tornillo sin fin, puesto que el material de desecho como soportes que son retirados después de realizar la impresión 3D podrá ser utilizado nuevamente e incluso si se requiere se podrá agregar PET en trozos pequeños ya que al ingresar al tornillo sin fin todo el material pasará por una cámara de calentamiento donde el PET y los residuos de impresión serán fundidos para iniciar el proceso de impresión.

Además, el diseño del sistema de refrigeración de la máquina es necesario para evitar sobrecalentamientos y daños de los actuadores o elementos electrónicos.

El diseño del sistema de producción completo de la máquina, empieza en la idealización de un concepto, plasmarlo en un software CAD y finalizarlo con el desarrollo del prototipo físico.

Estructura del documento

El documento se estructura con cinco capítulos con el desarrollo de un sistema de manufactura aditiva con micro-extrusión de polímero PET reciclado.

El capítulo 2 (Estado del Arte), se detalla los conceptos fundamentales de la impresión 3d y se analiza los diferentes tipos de polímeros utilizados en este ámbito, el proceso de reciclaje de polímeros. También se describe el control mecánico para el traslado de polímeros granulados y sensores capaces de medir las condiciones necesarias para la fluidez del polímero en estado semilíquido.

El análisis de los mecanismos que involucran la estructura del prototipo es realizado en el Capítulo 3 (diseño), se describe el desarrollo del diseño mecánico que se utilizó para la adaptación de los diferentes sensores, se detalla el diseño electrónico y los diagramas utilizados, finalmente se describe el diseño del control con su parte del controlador y su programación respectiva.

En el capítulo 4 (Construcción y Pruebas) se detalla la construcción y obtención de los elementos para la elaboración de la tesis, se detalla el montaje y la realización de pruebas con las cuales se obtienen los resultados.

Capítulo 5 (Conclusiones y Recomendaciones) una vez realizado todo el proceso se llega al resultado del proyecto con los cual se obtiene las conclusiones adecuadas. También se incluyen recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo II.

Estado del arte

El presente capítulo contiene conceptos generales sobre la impresión 3D, su historia y aplicaciones, también se detallan los tipos de plásticos comúnmente utilizados en las impresoras 3D y los métodos de impresión actuales. Adicionalmente, se presenta una descripción de los procedimientos de reciclaje y procesamiento de los polímeros para finalmente, presentar las propiedades térmicas de los materiales que deben ser consideradas durante el proceso de extrusión en las impresoras 3D.

Impresión 3D

La impresión 3D, también denominada manufactura aditiva es un proceso a través del cual se fabrican objetos sólidos de tres dimensiones partiendo de un modelo digital diseñado previamente en un software CAD. Dado que la pieza se crea mediante la adición sucesiva de material colocado en capas opuestas, la impresión 3D se considera un proceso aditivo. Se pueden crear objetos de gran complejidad utilizando este proceso.

La primera impresora 3D fue desarrollada por Charles Hull en 1983, la cual utilizaba un material denominado fotopolímero cuyo estado natural es líquido, se solidifica el material con luz ultravioleta; de esta manera, se iba colocando varias de capas del material hasta conseguir la forma del elemento deseado. Inicialmente la impresora 3D se encontraba limitada a la fabricación de objetos muy simples, sin embargo, para mediados de los años 80, se implementaron varias mejoras tanto en el código como su funcionamiento, lo cual permitió lanzarla al mercado como un producto comercial. A partir de ese momento, se han desarrollado nuevas tecnologías y procesos que han permitido convertir la impresión 3D en un proceso más eficiente, con la capacidad de ser utilizada en diferentes aplicaciones (Aguinsaca García, 2017).

Actualmente, la impresión 3D es utilizada en varios campos como la industria espacial, automotriz, médica, manufacturera, educación, etc., enfocada a un sinnúmero de aplicaciones, las piezas espaciales y su fabricación son las más destacables, prototipos de prueba, prótesis e implantes médicos, joyería, modelos educativos e incluso a nivel personalizado para la elaboración de juguetes o diversas piezas (Autodesk Latinoamérica, s.f.). En la Figura 9 se puede observar la impresora 3D diseñada por la NASA en la estación espacial internacional para la fabricación de piezas, la cual utiliza polímero reciclado e incluso permite reciclar las piezas fabricadas anteriormente para crear nuevos elementos.

Figura 9

Impresora 3D “The In-Space Refabricator” diseñada por la NASA



Nota: Tomado de ScienceAtNASA (2018).

Métodos o tecnologías de impresión 3D

Actualmente, existen varios métodos de impresión 3D los cuales se diferencian entre sí por el tipo de tecnología utilizada durante el proceso de fabricación, estos procesos pueden ser clasificados de acuerdo a la forma en que trabajan con la materia prima utilizada para la fabricación de los objetos. Por tanto, se pueden definir cuatro métodos principales: modelado por deposición de material fundido (FDM),

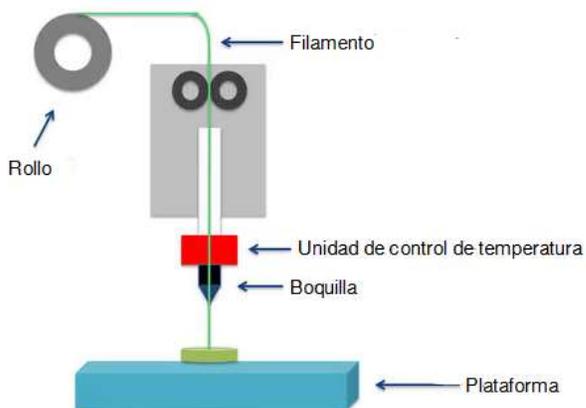
estereolitografía (SLA), sinterizado selectivo por láser (SLS), fabricación por corte y laminado (LOM) (Valverde Ponce, 2016).

Modelado por deposición de material fundido (FDM)

La tecnología de modelado por deposición de material fundido (FDM) utiliza un rollo de filamento hecho generalmente de materiales termoplásticos, el mismo que es dirigido hacia un cabezal donde se encuentra una boquilla de extrusión, la cual se calienta para fundir el material y dibujar una por una cada capa del objeto 3D sobre una mesa o plataforma, una vez que el material sale de la boquilla se solidifica rápidamente, lo que permite continuar con la siguiente capa. El proceso descrito se realiza continuamente hasta formar el objeto deseado, en la Figura 10 se puede observar un esquema de funcionamiento de la tecnología FDM.

Figura 10

Tecnología FDM para la impresión 3D



Nota: Tomado de Tu3DPrintLab (s.f.), <https://tu3dprintlab.club/impresion-3d-de-modelado-por-deposicion-fundida-fdm>

Esta tecnología es una de las más utilizadas a nivel mundial, debido a que presenta muchas ventajas, entre las principales se puede mencionar su bajo costo y amplia gama de materiales disponibles para su utilización. Sin embargo, también presenta ciertas

desventajas, por lo cual en la Tabla 1 se presenta una descripción de los beneficios y limitaciones que presenta el método en mención.

Tabla 1

Ventajas y desventajas de la tecnología FDM

Ventajas	Desventajas
-Bajo costo de fabricación e implementación	-Acabado superficial con laminado
-Alta disponibilidad y variedad de materiales	-Baja precisión comparada con otros métodos
-Materiales reciclables o poco contaminantes	
-Alto grado de escalabilidad	
-Bajo tiempo de fabricación comparada con otros métodos	

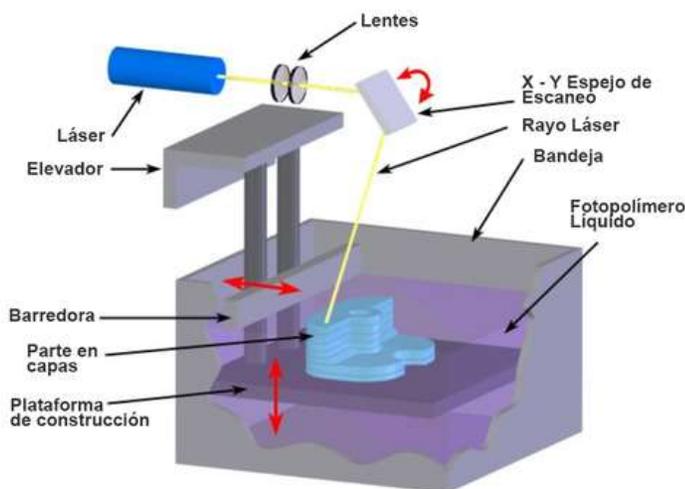
Nota: Adaptado de Valverde Ponce (2016)

Fotopolimerización- estereolitografía (SLA)

La tecnología de estereolitografía es un proceso de foto-solidificación que utiliza resinas líquidas foto-sensibles como materia prima. El fotopolímero se encuentra colocado sobre una plataforma y se solidifica mediante su exposición a un láser ultravioleta que va recorriendo la superficie y el contorno de cada capa de resina de acuerdo a la forma del objeto que se va a fabricar. La plataforma cuenta con un mecanismo que le permite moverse hacia abajo una vez que la capa ha sido solidificada, para continuar con la siguiente lámina de resina hasta terminar con el modelo, de manera que el objeto 3D se forma por una secuencia de capas (Aguinsaca García, 2017), en la Figura 11 se aprecia cómo funciona la tecnología SLA.

Figura 11

Tecnología SLA para impresión 3D



Nota: Tomado de Rivera (2020), <https://teqvita.pe/blogs/impresion-3d/5-configuraciones-para-mejorar-su-calidad-de-impresion-3d-sla-dlp-lcd>

La estereolitografía fue la primera tecnología utilizada para la impresión 3D y ha sido empleada ampliamente en diversos campos, por lo que se han podido identificar las ventajas y desventajas que se indican en la Tabla 2.

Tabla 2

Ventajas y desventajas de la Tecnología SLA

Ventajas	Desventajas
-Alto grado de precisión	-Alto costo de la impresora y materia prima
-Buena calidad en su acabado	-Los modelos fabricados pueden ser frágiles
-Los modelos fabricados con transparentes por lo que se puede visualizar su interior	-Requiere usar columnas de soporte
-Bajo tiempo de fabricación comparado con otros métodos	

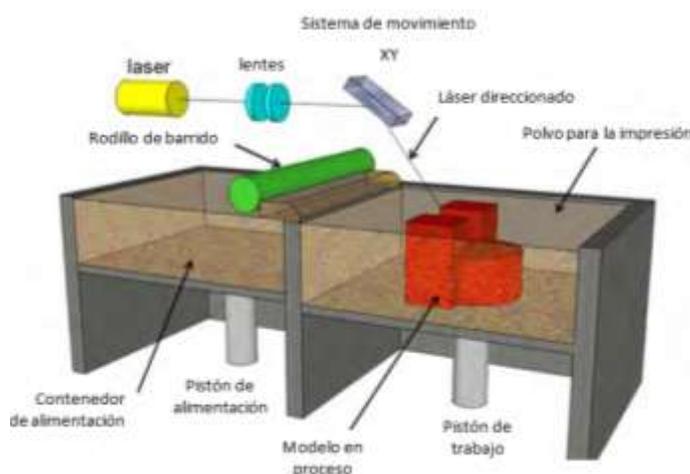
Nota: Adaptado de Valverde Ponce (2016)

Sinterizado selectivo por láser (SLS)

En el sinterizado selectivo por láser se realiza un proceso similar a la estereolitografía, pero en lugar de usar fotopolímeros, se emplean materiales granulares o polvos de diferentes clases, que se fusionan con ayuda de un láser que permite solidificarse a los polvos.

Figura 12

Tecnología SLS para impresión 3D



Nota. Tomado de Feistauer, Dos Santos y Amancio(2018)

La alimentación en esta impresora, consiste en un rodillo que se mueve arrastrando una pequeña capa el material granular sobre un pistón de fabricación para que sea sinterizada por el láser que se encuentra en la parte superior (López Leyva, 2012). En la Figura 12 se aprecia el funcionamiento de la tecnología SLS y en la Tabla 3 de describe tanto las ventajas como las desventajas de este tipo de tecnología.

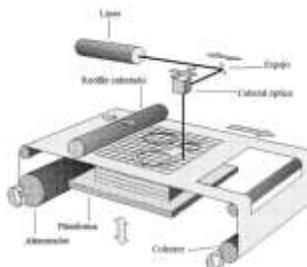
Tabla 3*Ventajas y desventajas de la tecnología SLS*

Ventajas	Desventajas
-Las piezas fabricadas soportan humedad y altas temperaturas	-El acabado superficial es laminado con textura rugosa
-No requiere utilizar columnas de soporte	-No se pueden realizar piezas muy delgadas
-Disponibilidad de varios materiales para fabricar los objetos pudiendo ser sólidos, flexibles, entre otros.	-Alto costo de las impresoras
-Alta precisión	

Nota: Adaptado de Valverde Ponce (2016)

Fabricación por corte y laminado (LOM)

En la fabricación por corte y laminado se utilizan materiales en forma de láminas, como por ejemplo papel, plástico, arena, etc., las cuales son alimentadas por medio de un sistema de rodillos. Una vez que la lámina es colocada sobre la plataforma de trabajo, es cortada por un láser en función del modelo diseñado para la pieza que se va a fabricar. Posteriormente, se pega la lámina sobre la capa anterior con la ayuda de un rodillo, dependiendo del material utilizado puede ser necesario el empleo de adhesivos para pegar las capas entre sí, mientras que otros materiales son adheridos únicamente por el calor del rodillo. En la Figura 13 se indica el esquema de funcionamiento de la tecnología LOM y en la Tabla 4 se presentan sus ventajas y desventajas.

Figura 13*Tecnología LOM para la impresión 3D*

Nota: Tomado de Infante Martín (2012)

Tabla 4

Ventajas y desventajas de la tecnología LOM

Ventajas	Desventajas
-Bajo costo de materia prima	-Baja calidad del acabado y textura final comparado con otros métodos
-Amplia gama de materiales disponibles	
-El material utilizado para la fabricación puede ser reciclado	-Algunos materiales requieren adhesivos para unir las capas, por lo que la resistencia de la pieza dependerá de las características del adhesivo.
-Menor tiempo de fabricación	
-Apto para fabricación de piezas grandes	-La impresora tiene un costo un poco elevado

Nota: Adaptado de Valverde Ponce (2016)

Tipos de plásticos utilizados en la impresión 3D

Los plásticos son utilizados a nivel mundial para infinitas aplicaciones y juegan un papel fundamental en el proceso de la impresión 3D, donde interviene como materia prima. Es importante considerar que la mayor parte de los plásticos ofertados actualmente en el mercado son sintéticos o semisintéticos, los cuales generalmente son procedentes de productos petroquímicos, por lo que pueden emitir sustancias tóxicas durante la impresión. Para cuidar el entorno natural, se ha incrementado la demanda de plásticos elaborados en base a materiales renovables como el ácido poliláctico (PLA), ya que no significa únicamente contribuir con la conservación ambiental, sino que presentan varias ventajas entre las cuales se puede mencionar bajo costo, facilidad de manufactura, disponibilidad, versatilidad, entre otras (Sánchez Restrepo, 2020). Dentro de los materiales plásticos más utilizados para la fabricación de piezas mediante la impresión 3D se puede mencionar:

- ABS o acrilonitrilo butadieno estireno: entre sus características más destacadas se encuentra su flexibilidad y alta resistencia al impacto, por lo que es utilizado en la industria automotriz y también en aplicaciones domésticas. Dentro de las desventajas del ABS se puede mencionar la emisión de sustancias tóxicas producidas al fundir el material.
- PLA o ácido Poliláctico: es un material biodegradable fabricado a partir del procesamiento de productos ricos en almidón, es sencillo de usar y en el mercado es posible encontrar una amplia disponibilidad de colores. Entre sus desventajas se puede mencionar su baja resistencia a la humedad y la posible formación de tensiones internas dentro de la pieza fabricada.
- ASA o acrilonitrilo estireno acrilato: su característica principal es que tiene mayor resistencia a la ultravioleta sin embargo en características es muy similar al ABS.
- PET o tereftalato de polietileno: es un material reciclable, que presenta características como rigidez y resistencia química, por lo que es útil para ser utilizado en aplicaciones relacionadas con la industria alimenticia. Cabe destacar que no emite sustancias tóxicas al utilizarlo en la impresión 3D.
- PC o policarbonato: es un material transparente. Entre sus principales fortalezas se puede mencionar su alta resistencia a la temperatura y deformaciones, por otro lado, tiene como desventaja el no ser un material biodegradable y la posibilidad de absorber la humedad del ambiente.
- Polímeros de alto rendimiento (PEEK, PEKK, ULTEM): se caracterizan por ser materiales livianos y a su vez presentar una gran resistencia térmica y mecánica, por lo que son muy apreciados en aplicaciones espaciales, automotrices y médicas.
- Nylon: Este material se utiliza generalmente en la tecnología SLS, ya que se lo utiliza en forma de polvo granular, pero también es posible encontrarlo en forma de filamentos

para ser utilizado en la tecnología FDM. El nylon presenta propiedades como flexibilidad, resistencia mecánica y una alta calidad en el acabado.

Tratamiento de polímeros

La utilización de plásticos ha aumentado considerablemente durante los últimos años, lo cual ha provocado preocupación debido a que la mayoría de ellos están destinados a un solo uso, para posteriormente ser dechados sin considerar su reducida degradabilidad, lo cual genera un alto grado de contaminación. Por tanto, se vuelve indispensable un adecuado tratamiento de los diversos polímeros, con la finalidad fomentar su reutilización en otras aplicaciones y de esta manera contribuir a la preservación del ambiente (Arandes, Bilbao, & López Valerio, 2004).

Reciclaje de los polímeros

El reciclaje de los diferentes plásticos es un tema de gran relevancia en la actualidad, donde se pretende reducir el desperdicio producido por el desecho de los mismos, por lo que se han definido cuatro métodos de reciclaje: primario, secundario, terciario y cuaternario.

Reciclaje primario

El proceso de reciclaje primario busca la reutilización de los plásticos para aplicaciones distintas, para lo cual se realiza una separación, limpieza y peletizado de los mismos. La separación puede realizarse de forma manual o automáticamente, donde se puede clasificar los plásticos de acuerdo al tipo, tamaño o forma. La limpieza implica retirar los residuos de comida, líquidos, polvos, etc., que se encuentran adheridos al plástico para posteriormente molerlos o granularlos. Una vez granulado, puede ser utilizado para diferentes aplicaciones o se lo puede convertir en pellets (Quito Chulca & Villafuerte Chompol, 2011).

Reciclaje secundario

El proceso de reciclaje secundario consiste en la combinación o reprocesamiento de varios residuos plásticos para formar otros productos que tendrán propiedades inferiores a los originales. Los polímeros pueden ser molidos o fundidos para fabricar los nuevos artículos (Quito Chulca & Villafuerte Chompol, 2011).

Reciclaje terciario

El proceso de reciclaje terciario implica la intervención de procesos químicos con la finalidad de modificar la estructura de los plásticos y degradarlos, de esta manera se utiliza para la fabricación de productos nuevos, los cuales pueden ser totalmente diferentes a los originales. Entre los procesos químicos más utilizados se puede mencionar los procesos de: pirólisis, gasificación, glicólisis, entre otros (Vázquez Morillas, Espinosa Valdemar, Beltrán, & Velasco Pérez, 2016).

Reciclaje cuaternario

El proceso de reciclaje cuaternario consiste en el aprovechamiento de la energía térmica liberada a través del calentamiento o la incineración de los plásticos, es decir se emplean los plásticos como combustible. Es importante considerar que este proceso implica la generación de gases contaminantes, lo cual afecta directamente al medio ambiente (Vázquez Morillas, et al., 2016).

Clasificación de los polímeros

Los polímeros pueden ser encontrados en varios productos de uso cotidiano, tales como empaques de alimentos, bebidas, productos de aseo, fundas plásticas, entre otros, cada uno con características particulares, lo que implica que requieren procesos de reciclaje distintos. Por lo tanto, para realizar un adecuado desarrollo de los procesos de reciclaje es necesario tener en cuenta la clasificación de los mismos.

Arandes, Bilbao y López Valerio (2004) mencionan que para facilitar el reconocimiento de los distintos tipos de plásticos reciclables, se ha implementado un sistema de clasificación numérica de acuerdo a sus características y facilidad para ser reciclado. Los productos plásticos contienen impreso un número de identificación en el rango del 1 al 7 colocado dentro de un triángulo, esta codificación fue propuesta por la Sociedad de la Industria de los Plásticos (SPI) en 1988 y actualmente es utilizado en todo el mundo. En la Figura 14 se puede observar la codificación de los plásticos de acuerdo a su clasificación, cabe recalcar que el número 7 asociado a otros tipos de plásticos, son aquellos que requieren un proceso de reciclaje de mayor complejidad comparado con los demás.

Figura 14

Clasificación numérica de los tipos de plásticos-Tipos de plásticos de acuerdo a su clasificación numérica



Nota: Tomado de Gestores de Residuos(2020)

Tereftalato de Polietileno (PET, PETE)

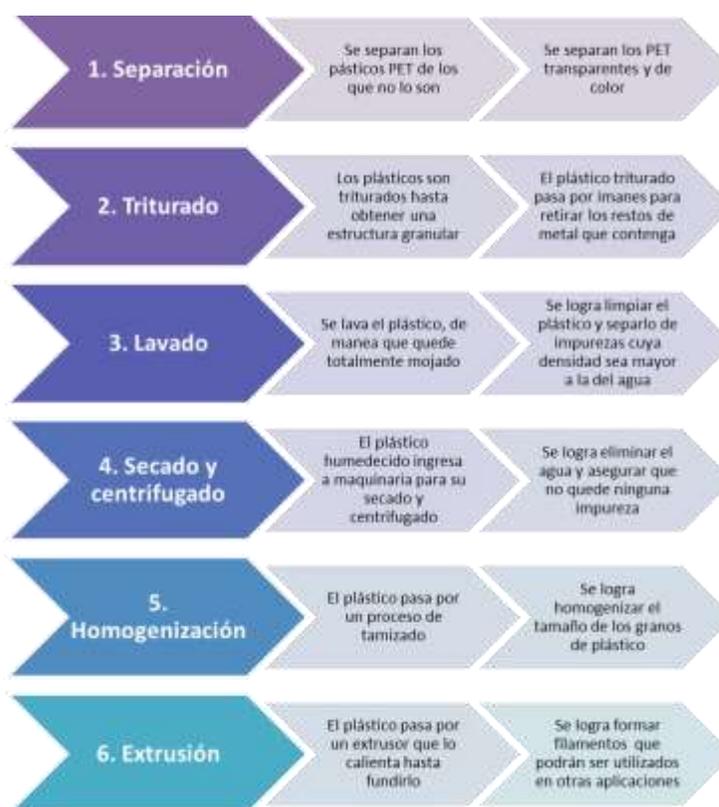
El plástico PET es el tipo de polímero más utilizado a nivel mundial y el más fácil de reciclar, son fabricados generalmente mediante los procesos industriales de soplado,

termoformado, inyección y extrusión. Sus características como transparencia, resistencia al desgaste e impacto, resistencia química, impermeabilidad, peso ligero, excelentes propiedades térmicas y su barrera contra el oxígeno, CO₂ y la humedad, lo convierten en un producto ideal para su utilización en la fabricación de botellas para bebidas, bandejas, envases para alimentos, y otros productos.(Arapack, 2018).

Los plásticos PET pueden ser reciclados varias veces, el proceso de reciclaje pretende reprocesarlos y acondicionarlos para que puedan ser utilizados como materia prima dentro de otros procesos de producción. El procedimiento para reciclaje de los materiales PET se puede describir en seis etapas, las cuales se observan en la Figura 15.

Figura 15

Etapas para el reciclaje de los plásticos PET

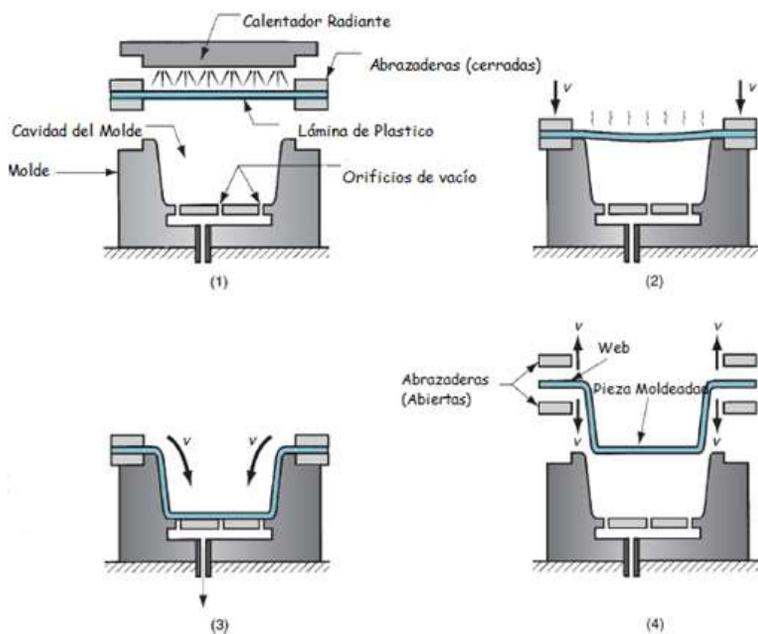


Procesamiento de los polímeros

Los polímeros presentan excelentes propiedades que permiten procesarlos para darles diversas formas y crear nuevos productos, por lo que se han desarrollado distintos procesos para el tratamiento y transformación de los plásticos, en los que generalmente interviene el calor o la presión, siendo seleccionados dependiendo del tipo de polímero y la aplicación que se le dará a los productos fabricados. Entre los procesos más comunes se puede mencionar el modelado por termoformado, soplado, inyección y extrusión, entre otros (Kunststoffdreherei GmbH, 2019).

Termoformado

El termoformado consiste en transformar una lámina o plancha de plástico en un objeto tridimensional por medio de la aplicación de calor y fuerza mecánica, vacío o presión. Inicia el proceso cuando la plancha de plástico es calentada a una temperatura moldeable, para posteriormente colocarlo sobre una matriz, la cual generalmente es de madera o aluminio para que el plástico se adapte a su forma a través de la aplicación fuerza mecánica, vacío o aire a presión. Finalmente, se requiere un sistema de enfriado para permitir que el plástico recupere su rigidez original (Espinosa Aguilar, 2019), en la Figura 16 se puede observar las etapas del termoformado.

Figura 16*Etapas del proceso de termoformado*

Nota: Tomado de Álvarez Vargas (2019), <https://berserk.design/termoformado/>

El material más utilizado en la industria para el proceso de termoformado son los plásticos PET. Sin embargo, cabe mencionar que existen otros materiales que también son ampliamente utilizados para este proceso, entre los cuales se puede mencionar el ABS, poliestireno HIPS, poliestireno de alta densidad (HDPE), cloruro de polivinilo (PVC) y los plásticos PET y PETG.

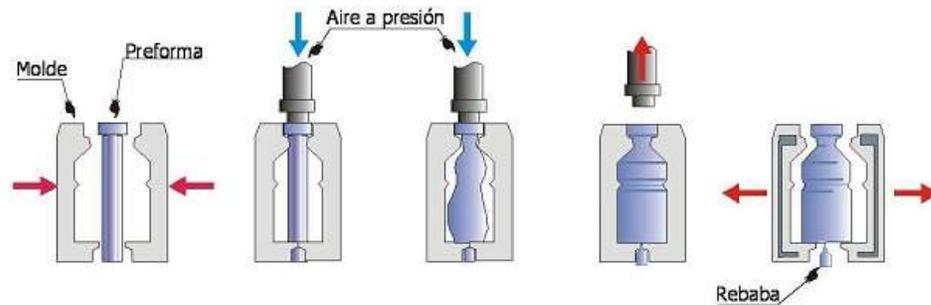
Soplado

Cuando se necesita objetos de poco espesor y que sean huecos se utiliza el soplado, como botellas y recipientes, donde se utiliza aire a presión para expandir el plástico dentro de un molde, con la finalidad de que tome su forma. Los materiales más utilizados para el proceso de soplado son polipropileno, PVC, poliuretano y PET. El proceso inicia utilizando una preforma caliente de plástico (generalmente de forma tubular), la cual es ingresada en un molde hueco que consta de dos partes, se cierra el

molde y se inyecta aire a presión para que el plástico se expanda y se acople la forma del molde. Finalmente, se enfría la pieza y se la retira del molde para cortar las rebabas o material sobrante, en la Figura 17 se observa un esquema del proceso de soplado.

Figura 17

Etapas del proceso de soplado



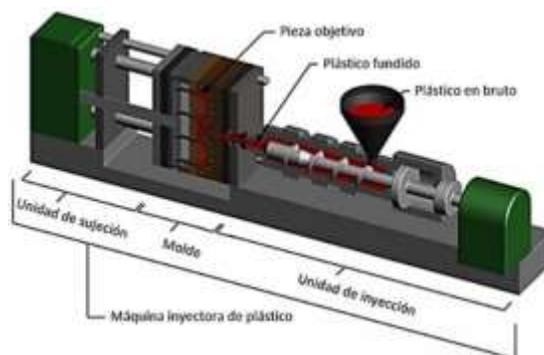
Nota: Tomado de Cómo funciona (2020), <https://como-funciona.com/moldeo-soplado/>

Inyección

Este proceso se realiza colocando a presión un material de tipo plástico en un molde que formará una pieza, lo cual se realiza en máquinas especializadas denominadas inyectoras (Ver Figura 18). El procedimiento inicia con la colocación de material plástico granulado en una tolva de alimentación, mientras que un husillo giratorio empuja el material generando presión y los calefactores funden el plástico, una vez llena la cámara de inyección el husillo empuja el plástico para llenar el molde que se encuentra en el otro extremo, se espera hasta que la pieza se solidifique para finalmente abrir el molde y desmontar la pieza.

Figura 18

Partes de una máquina inyectora de plástico



Nota: Tomado de Jurado, Reveles, Plascencia y Aguilera (2019),

Extrusión

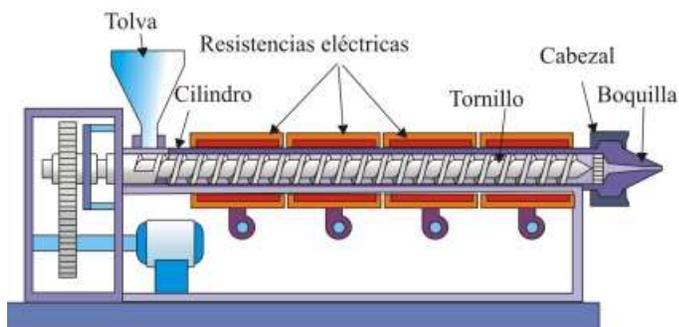
La extrusión de plástico es un proceso muy utilizado industrialmente ya que presenta varias ventajas, entre las que destacan el bajo costo de la maquinaria comparada con los demás procesos, la operación continua y facilidad para fabricar secciones transversales constantes y complejas. La extrusión consiste en fundir el material plástico para darle una forma deseada al pasarlo a través de una boquilla aplicando un sistema de presión constante, mediante este proceso se pueden realizar varios productos como filamentos, tuberías, mangueras, perfiles entre otros, para lo cual se utiliza generalmente polímeros como el polipropileno, PET, PVC, polietileno y poliestireno, etc. (Gómez & Gutiérrez, 2007).

Una máquina extrusora contiene una tolva por donde ingresa la materia prima, es decir el plástico granulado el cual es desplazado por un tornillo metálico que se encuentra dentro de un cilindro cubierto con una camisa que contiene resistencias eléctricas, las mismas que se encargan de fundir el material mientras es comprimido por el tornillo, con la finalidad de homogeneizarlo. En el extremo del tornillo, se encuentra la boquilla por donde sale el material, la cual tendrá orificios de acuerdo a la forma del elemento que se

desea fabricar. En la Figura 19 se puede observar una extrusora común con su esquema respectivo.

Figura 19

Esquema de una extrusora de tornillo simple



Nota: Tomado de Beltran y Marcillo (2012), https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

Propiedades térmicas de los polímeros

De acuerdo a la estructura molecular se definen las propiedades térmicas de los materiales, es decir si es un polímero amorfo, semicristalino o cristalino y son las que rigen el comportamiento que tendrá el polímero al ser sometido a variaciones de temperatura, por lo que resulta de gran importancia tomarlas en cuenta al trabajar en procesos de tratamiento, moldeado o transformación de los plásticos. Para el proceso de extrusión de plásticos es necesario tomar en cuenta sus propiedades térmicas, de manera que se asegure un adecuado procesamiento del material para obtener el resultado esperado, por tanto, se debe analizar el punto de transición vítrea y el punto de fusión de los polímeros.

Punto de transición vítrea (Tg)

Es una propiedad térmica de los polímeros especialmente considerada cuando se trabaja con polímeros de estructura amorfa, para los cuales no existe una temperatura de fusión establecida. El punto de transición vítrea es la temperatura a la cual el polímero pasa del estado sólido a una contextura viscosa y elástica, esto provoca que la capacidad calorífica del plástico cambie, su volumen específico y la disminución o pérdida de sus propiedades mecánicas iniciales (González, 2018). La Tg de un polímero puede ser alta o baja dependiendo de la movilidad que tengan sus cadenas moleculares; es decir, si las cadenas poliméricas tienen facilidad para moverse la Tg del material será baja, ya que no será necesario suministrarle mucho calor para que el material adquiera una contextura flexible, por otro lado, si su movilidad es reducida la Tg será alta.

La mayoría de polímeros sintéticos como el ABS, policarbonato, PVC, poliestireno, polivinilo, etc., poseen una estructura amorfa, por tanto al trabajar con ellos dentro de los distintos procesos de fabricación, es necesario tomar en cuenta su temperatura de transición vítrea y asegurarse que el material se enfríe completamente antes de ser desmoldado, así pues la temperatura pasa por debajo de la Tg, permitiendo que el polímero recupere todas sus propiedades mecánicas y de esta manera evitar daños permanentes en las piezas producidas por los esfuerzos generados en la expulsión del molde.

Temperatura de fusión (Tm)

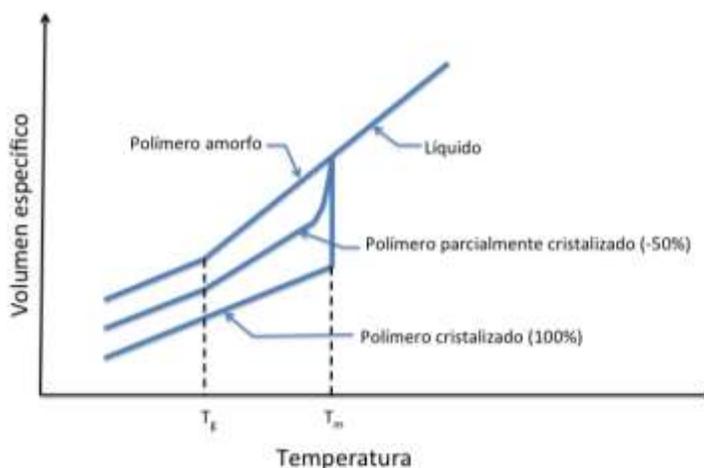
Es una propiedad térmica de los polímeros, considerada de gran importancia para aquellos que poseen una estructura cristalina o cadenas moleculares ordenadas. La temperatura de fusión es aquella en la cual el polímero pasa del estado sólido al líquido viscoso, cambiando sus propiedades tales como capacidad calorífica, densidad, resistencia mecánica, entre otras. Normalmente para el caso de los plásticos, la fusión se

lleva a cabo en un rango de temperatura y no en un valor exacto debido a su estructura química. Sin embargo, se suele tomar como referencia una temperatura de fusión de equilibrio, obtenida por medio de una extrapolación de los datos obtenidos en varios estudios realizados para determinar el punto de fusión de los diferentes polímeros (Sepe, 2011).

Para el caso de los polímeros semi cristalinos como el PET y polietileno de alta densidad, se puede destacar que tienen un comportamiento combinado, es decir presentan las fases cristalina y amorfa, por lo que adquiere una contextura viscosa al llegar a la temperatura de transición vítrea y se funde completamente cuando es sometido a su temperatura de fusión, cabe destacar que la temperatura T_m siempre será mayor que la T_g . En las Figura 20 y Figura 21 se puede observar el comportamiento de los polímeros amorfos, semi cristalinos y cristalinos en función de la variación de temperatura.

Figura 20

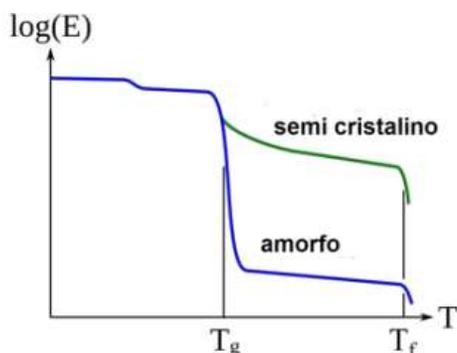
Volumen específico vs temperatura.



Nota: Tomado de López Serrano y Mendizábal Mijares (2015),

Figura 21

Conducta de los polímeros vs la temperatura



Nota: Tomado de López Serrano y Mendizábal Mijares (2015)

Temperatura de transición vítrea y fusión de los polímeros

En la **Tabla 5** se pueden observar las temperaturas de transición vítrea y fusión de los polímeros mayormente utilizados en la industria para los diferentes procesos de producción.

Tabla 5

Temperaturas de transición vítrea y fusión de polímeros

Material	Temperatura de transición vítrea (T _g)	Temperatura de fusión (T _m)
	[°C]	[°C]
Poliétileno (baja densidad)	-110	115
Poliétileno (alta densidad)	-90	137
Cloruro de polivinilo PVC	105	212
Polipropileno	-20	175
Poliestireno	100	-
Nylon 66	57	265
Tereftalato de polietileno (PET)	73	265
Policarbonato	150	-

Nota: Adaptado de *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (p.499) por Callister, 1996, Editorial Reverté S.A.

Síntesis

La impresión 3D es un proceso orientado a la fabricación de objetos sólidos tridimensionales partiendo de un modelo digital diseñado en un software CAD, es considerada como un proceso aditivo, ya que es un proceso por capas. Se caracteriza por ser un proceso ágil y eficiente, lo cual ha permitido que sea ampliamente utilizado en las industrias automotriz, médica, espacial, manufacturera, entre otras. La primera impresora 3D fue creada por Charles Hull en 1983 utilizando la tecnología de la estereolitografía.

En la impresión 3D se utiliza varios métodos o tecnologías para la fabricación de las piezas, los cuales se diferencian entre sí por la forma en que trabajan con la materia prima y los recursos utilizados. Por tanto, se pueden definir cuatro métodos principales, el modelado por deposición de material fundido (FDM) donde la materia prima es un filamento de material termoplástico el cual es extruido para dar la forma requerida a las piezas. La estereolitografía (SLA) utiliza resinas en estado líquido, las cuales se condensan al ser sometidas a un láser de luz ultravioleta. El sinterizado selectivo por láser (SLS) pero utiliza materiales granulares o polvos y, por último, la fabricación por corte y laminado donde se utilizan materiales en forma de láminas, las cuales son cortadas por un láser de acuerdo a la forma de la pieza.

El adecuado tratamiento de los polímeros tiene como la finalidad permitir su reutilización en otras aplicaciones y de esta manera evitar el desperdicio y la contaminación, contribuyendo a la preservación del ambiente. En el reciclaje de los polímeros se pueden distinguir cuatro métodos: el reciclaje primario donde se realiza la recolección, separación y limpieza de los plásticos para reutilizarlos en aplicaciones distintas a las originales. El reciclaje secundario consiste en la reprocesamiento de los plásticos para fabricar nuevos productos. El reciclaje terciario incluye la utilización de

procesos químicos para modificar la estructura de los plásticos para mediante degradación obtener materia prima y elaborar nuevos productos. Y, por último, el reciclaje cuaternario implica el calentamiento o incineración de los plásticos para aprovechar la energía térmica liberada, utilizándola como combustible.

Los polímeros presentan excelentes propiedades físicas, químicas, térmicas y mecánicas que los convierten en materiales ideales para ser procesados y darles diversas formas con la finalidad de crear nuevos productos, para lo cual se han desarrollado distintos procesos de tratamiento y transformación de los plásticos, en los que generalmente interviene el calor o la presión. Entre los procesos más comunes se puede mencionar el modelado por termoformado donde se utilizan láminas de plástico que son calentadas y colocadas sobre un molde, aplicándole presión para que adquiera la forma del mismo. Mediante soplado se obtienen objetos de poco espesor, como botellas y recipientes, donde se utiliza aire a presión para expandir el plástico dentro de un molde, con la finalidad de que tome su forma. Por otro lado, la inyección consiste en colocar a presión un material plástico fundido dentro de un molde para formar una pieza, lo cual se realiza en máquinas especializadas denominadas inyectoras y la extrusión consiste en fundir el material plástico para darle la forma deseada al pasarlo a través de una boquilla

Las propiedades térmicas de los materiales son características imprescindibles cuando se desea trabajar con polímeros, ya que rigen su comportamiento al ser sometido a variaciones de temperatura. Las propiedades térmicas pueden variar en función de la estructura química del material, pudiendo ser amorfo, semicristalino o cristalino, por lo que se debe considerar el punto de transición vítrea para el caso de los materiales de estructura amorfa y semicristalina y el punto de fusión para los materiales cristalinos y semicristalinos.

Capítulo III

Diseño

Diseño de un sistema de manufactura aditiva con micro-extrusión de polímero PET reciclado

Este capítulo se centra en el diseño de un sistema de fabricación aditiva mediante microextrusión de polímero PET reciclado. Primero elabora una matriz de calidad para definir las principales necesidades de los usuarios y sus requerimientos técnicos. Las especificaciones y requisitos permiten precisar la estructura funcional y los subsistemas adecuados. Se proponen alternativas para el diseño de cada elemento, y se evalúan las fortalezas y debilidades de cada elemento para seleccionar la mejor alternativa. Después de eso, se calcula y redimensiona cada elemento que formará parte del sistema.

Matriz de la calidad

La matriz de la casa de la calidad es utilizada principalmente para el análisis de las características requeridas ya sean funcionales o de aspecto técnico, lo que se realiza para determinar los subsistemas del prototipo es ponderar de acuerdo al nivel de importancia de cada uno.

Definición de necesidades

Se definen necesidades como los requerimientos puntuales del equipo por parte del usuario, es un punto de inicio en la definición de características tanto técnicas como funcionales en el diseño del prototipo, se optimiza los parámetros para llegar a este objetivo.

En la Tabla 6 se encuentran denotadas los principales requerimientos que se analizarán para la elaboración del prototipo.

Tabla 6*Requerimientos o necesidades del usuario*

No.	Requerimientos
1	El extrusor debe ser capaz de utilizar plástico reciclado
2	Estructura duradera
3	De bajo riesgo para su uso
4	Debe ser económico y eficiente
5	Capacidad baja de carga
6	Debe permitir la interacción con el usuario
7	Facilidad de mantenimiento
8	Alcanzar a imprimir un tamaño promedio
9	Software de control de uso libre
10	Procesar cualquier tamaño de plástico reciclado

Definición de características técnicas

En la Tabla 7 se establece cada una de las especificaciones técnicas, a partir de las necesidades en la tabla anterior.

Tabla 7*Especificaciones técnicas del proyecto*

No.	Requerimientos
1	Terminal con extrusor polifuncional
2	Robusto
3	Seguridad Industrial
4	Costo reducido
5	Material ligero de bastidor y extrusor
6	Interfaz elaborada de acuerdo con normas
7	Sistema modular
8	Geometría de la impresora 3D
9	Software de programación de acceso libre
10	Extrusor automática

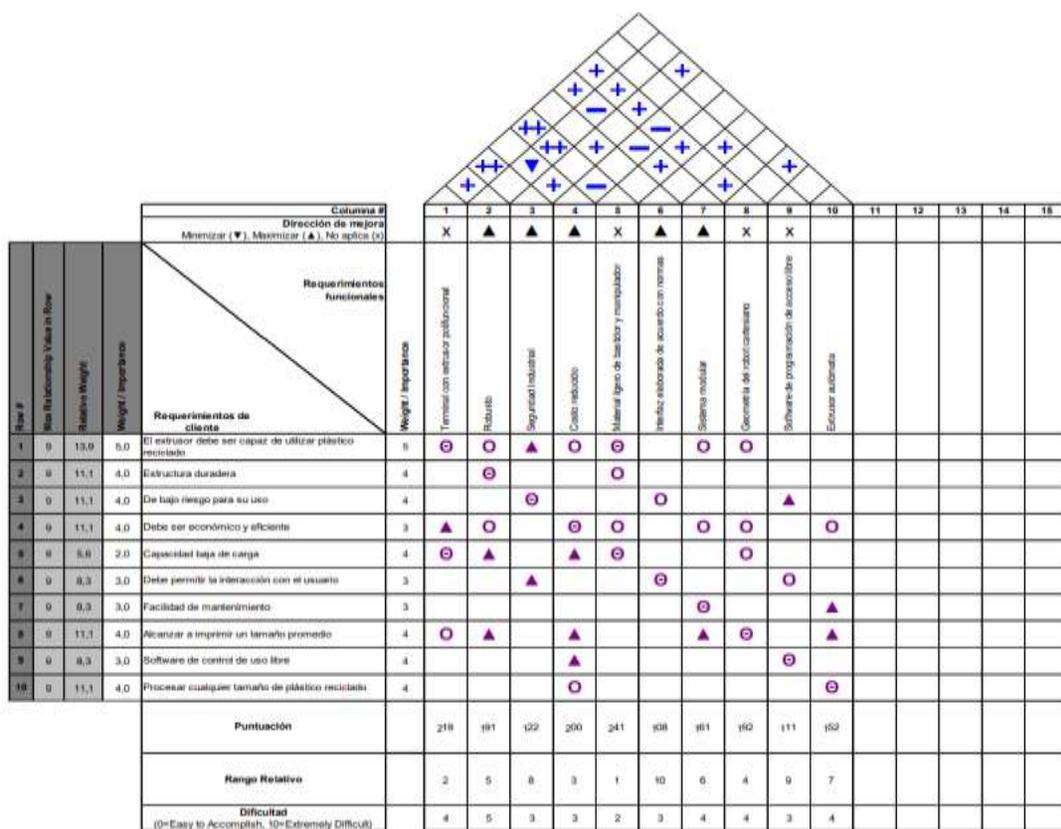
QFD

En el desarrollo de la casa de calidad "Quality Function Deployment" se destaca la interacción que existe entre las necesidades del cliente con las particularidades técnicas.

También permite disponer la predisposición relativa de cada uno en relación con los demás, así como valorar parcialmente el grado de obstáculo que implica conseguirlo, con el fin de conseguir el mejor resultado ideal para el producto propuesto. (Ficalora & Cohen, 2009).

Figura 22

Matriz QFD del proyecto



Para el análisis de las correlaciones que se utiliza la simbología japonesa que se indica en la **Tabla 8**.

Tabla 8

Escala japonesa de correlación entre requerimientos

Muy Correlacionado		9
Correlacionado		3
Poco Correlacionado		1
Ninguna		

Fuente: (Ficalora & Cohen, 2009)

En la Figura 22 se muestra la Matriz QFD, en esta matriz lo indispensable es identificar las necesidades del consumidor para de acuerdo a ello establecer un orden de importancia para priorizar lo más importante, identificadas las necesidades se busca un lenguaje técnico que permita cuantificar o cualificar las características del sistema. Tabla 9

En la Figura 22 se muestra la matriz QFD, una vez obtenidas las necesidades del usuario se colocan en esta matriz de forma que nos permite valorar de acuerdo a un rango de relevancia y así primar las características principales del sistema a desarrollar.

Con la identificación de las necesidades y de acuerdo a la importancia que se obtuvo en la Matriz QFD se procede a enfocarlas a la parte técnica Tabla 9, con lo que se obtiene una matriz eficaz.

Tabla 9

Resultados de la matriz QFD

Hito	Características Técnicas	Puntuación
1	Material de bastidor y extrusor	241
2	Terminal con extrusor polifuncional	219
3	Costo reducido	200
4	Geometría de la impresora 3D	192
5	Robusto	191
6	Sistema modular	161

7	Extrusor automática	152
8	Seguridad Industrial	122
9	Software de programación de acceso libre	111
10	Interfaz elaborada de acuerdo con normas	108

Factibilidad y planeación

Estructura funcional

A partir de la obtención de los resultados correspondientes de la matriz QFD, es posible la obtención de subsistemas acordes las características técnicas definidas con anterioridad. Cuyo objetivo principal es descomponer el sistema en módulos de funcionamiento independientes entre sí, pero correlacionados para trabajar de manera que se cumpla con los requerimientos del usuario.

Para el desarrollo del sistema de manufactura aditiva con micro-extrusión de polímero PET reciclado se definen los siguientes Sistemas en la Tabla 10.

Tabla 10

Sistemas definidos para el diseño

No.	Sistema	Funciones	Hitos que cumplir
1	Estructura de la impresora 3D	Posicionamiento en los ejes X, Y, Z del extrusor	1,2,3,4,5,6,7
2	Sistema Mecánico	Movimiento de los ejes	2,3,4
3	Sistema de procesado de polímeros	Traslado y transformación del polímero.	4,8
4	Sistema de Potencia	Sistema de alimentación y actuadores	1,2,3,6
5	Sistema de Control	Algoritmo de control y software	8,9

Diseño de un producto según (Rod, 2014), el proceso presenta dos etapas:

- Diseño Preliminar: es aquí donde se realiza la numeración, evalúan y seleccionan las diferentes elecciones de diseño.

- Diseño Final: en esta etapa se desarrollan las alternativas seleccionadas.
- El diseño mecánico, el electrónico, el control y el software se toman en cuenta para ampliar la tesis.

Se consideraron varias ideas, siendo la siguiente la más notable.

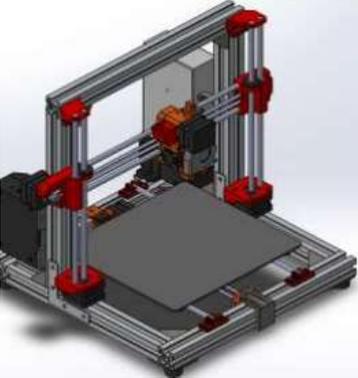
No	Concepto	Características
1		<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de alimentación de polímero independiente. • Estructura ligera • Reducido número de piezas • Capacidad de carga baja
2		<ul style="list-style-type: none"> • Visión acoplada a la estructura • Sistema de transmisión por engranajes • Estructura medianamente ligera. • Capacidad de impresión media
3		<ul style="list-style-type: none"> • Alimentador de polímero independiente • Estructura medianamente ligera • Piezas de arquitectura modular • Capacidad de carga baja • Reducido número de piezas

Figura 23

Concepción para una impresora 3D de PET



Sistema 1. Estructura de la impresora 3D

Ya que la estructura es un punto clave en la elaboración de este proyecto se considera los aspectos más importantes para su diseño y desarrollo ver Tabla 11:

Tabla 11

Parámetros requeridos en la estructura de la impresora 3D

Parámetro	Característica
Configuración de la impresora	Se la selecciona la configuración cartesiana porque permite obtener mejor orientación y movimientos complejos con mayor facilidad.
Capacidad de carga de polímero	La capacidad de carga del contenedor del polímero es de 100 gramos como máximo, el cual será transportado con el extrusor de acuerdo al punto de impresión.
Grados de Libertad	Es necesario 3 grados de libertad, puesto que se utilizarán los ejes XYZ para la definir la posición del extrusor de polímeros reciclados.
Velocidad	La velocidad que alcance del extrusor de polímeros reciclados puesto que no se requiere velocidades altas se aproximaría 0.8 mm/s,

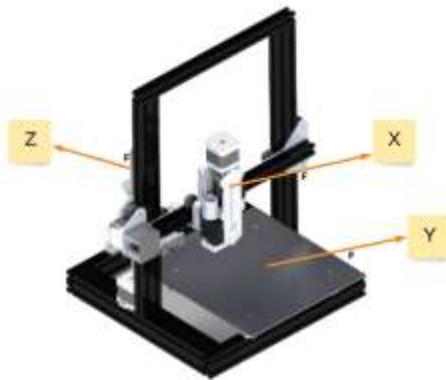
	Además, la velocidad de extrusión del actuador correspondiente se establece en 0.5 mm/s.
Volumen de impresión máxima	Se considera la distancia en los ejes XYZ que se requeriría para imprimir un objeto con respecto a los puntos iniciales en donde se encuentra el extrusor, por lo cual se establece un volumen máximo de 20x20x25 cm ³ .

El robot cartesiano se divide en un subsistema de referencias mostrado en la Figura 24 que son:

- Subsistema de referencia X
- Subsistema de referencia Y
- Subsistema de referencia Z

Figura 24

Subsistemas de la impresora 3D



Dimensionamiento del eje Y

El tipo de impresora 3d es de tipo cartesiana de elevación de base de impresión, ahora se determinará el tipo de transmisión de movimiento y el motor a usarse en cada uno de sus ejes en la Figura 24 se puede observar los componentes utilizados para el eje Y.

Al determinar el tipo de disposición que tiene la impresora 3D como un robot cartesiano. A continuación, se determina la forma de transmitir movimiento a la plataforma en dirección del eje Y, además del tipo de motor que se usara para el cometido.

Transmisión de movimiento

La mejor manera de transmitir el movimiento circular que tiene el eje de cualquier motor capaz de mover en forma lineal, son las alternativas que se describen a continuación.

Solución A: Tornillo sin fin – Tuerca.

En este tren de transmisión, el motor ejerce un movimiento de rotación sobre el tornillo sinfín, y cuando el tornillo sinfín hace contacto con la tuerca, lo impulsa linealmente, lo que proporciona una ventaja mecánica al sistema al aumentar el empuje sobre la tuerca en relación con el par de salida del motor, al tiempo que permite la velocidad de salida para un control de movimiento más preciso. Este mecanismo permite la máxima transferencia de potencia como se aprecia en la Figura 25.

El movimiento se transmite de tal manera que girar el eje del motor, que está conectado a una rosca infinita en un extremo, lo hace girar a la misma velocidad. Hay un clavo infinito que se mueve linealmente en cualquier parte del clavo, lo que hace que la plataforma conectada a él se mueva a la misma velocidad y en la misma dirección. El mecanismo mencionado Figura 25 permite transmitir la máxima potencia del actuador colocado.

Figura 25

Transmisión tornillo sin fin – tuerca.



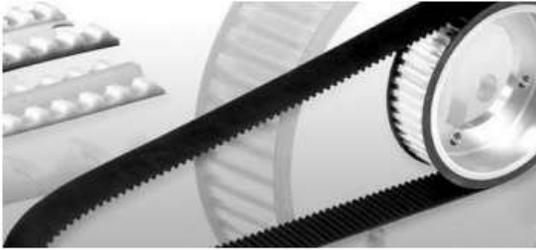
Fuente: (WMH, 2021)

Solución B: Piñón – Correa dentada.

El piñón transmite el movimiento a otro eje en la transmisión del movimiento por la cinta de dientes de piñón a través de un eje, o el movimiento también se transmite por una cinta de dientes con un paso igual al del piñón. El pistón y el embrague inducido constituyendo la relación de transmisión; la ventaja es que los componentes pueden montarse a diferentes distancias, y transmitir más potencia que las bolas de los ejes; el sistema de pista dentada por el pistón se muestra en la Figura 26. El sistema de piñón o correa dentada realiza la transmisión de movimiento al ser conectadas 2 piñones o engranajes a través de una correa dentada, la misma que posee un paso igual al del piñón o engranaje. Esto admite que la relación de transmisión sea igual a la relación de dientes del piñón conectado al eje del motor con el piñón o engranaje del extremo a transmitir. La ventaja que obtenemos es que podemos conectar componentes que se encuentren a una distancia considerable, la conexión se muestra en la Figura 26.

Figura 26

Transmisión tornillo piñón – correa dentada.



Fuente: (WMH, 2021)

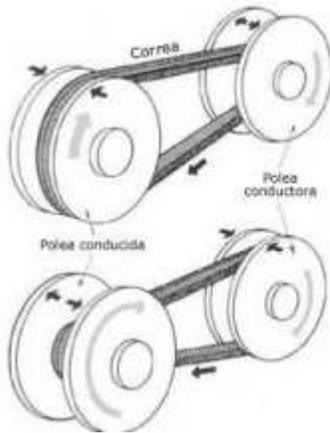
- **Solución C: Transmisión de movimiento por Polea – Banda plana.**

El movimiento de una polea se transmite a otra polea través de una correa plana. La relación de transmisión está dada por los diámetros de las poleas, desventaja de este tipo de transmisión su potencia de transmisión es inferior, el sistema se puede apreciar en la Figura 27.

Al usar este tipo de sistema, lo que hace es permitir la transmisión de movimiento mediante la conexión de poleas, cuyos diámetros son interconectados con una banda plana en donde se aprovecha para utilizar en distancias mayores a las convencionales, el inconveniente que se presenta es que hay pérdidas de potencia mecánica con respecto a otros sistemas de transmisión de movimiento. Se puede visualizar el montaje de este tipo de transmisión en la Figura 27.

Figura 27

Transmisión polea – banda plana



Fuente: (WMH, 2021)

Al describir las propiedades de cada sistema de transmisión, se elige la mejor alternativa toma en consideración las características necesarias que debe tener la impresora 3D.

- Permite mayor transmisión de potencia.
- Velocidad en el movimiento.
- Aumento de fuerza.
- Facilidad de fabricación e instalación.
- Costo de montaje del sistema.

A continuación, siguiendo las etapas del diseño se procede a ponderar los criterios ver Tabla 12 para una selección más acorde a las características técnicas que se planteó con anterioridad. En el cual se da un valor más alto al más relevante para este propósito.

Tabla 12

Criterios de evaluación para el sistema de transmisión de movimiento eje Y y su ponderación respectiva.

Criterio	Costo	Peso	Movilidad	Implementación	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo	-	0	2,5	2,5	6	0,18
Peso	5	-	0	2,5	8,5	0,25
Movilidad	2,5	5	-	2,5	11	0,32
Implementación	2,5	2,5	2,5	-	8,5	0,25
				Total	34	1

A continuación, procedemos de la siguiente manera: cada solución se evalúa utilizando los criterios propuestos (véase el cuadro 13, el cuadro 14, el cuadro 15, y el cuadro 16), y se elige una de las alternativas planteadas anteriormente en función del peso alcanzado.

Tabla 13

Ponderación de costos para las alternativas del sistema de transmisión de movimiento eje Y.

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	5	5	11	0,61
Solución B	0	-	5	6	0,33
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1

Tabla 14

Ponderación de peso para las alternativas del sistema de transmisión de movimiento eje Y.

Peso	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	5	6	0,33
Solución B	5	-	5	11	0,61
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1

Tabla 15

Ponderación de movilidad para las alternativas del sistema de transmisión de movimiento eje Y.

Movilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	5	5	11	0,61
Solución B	0	-	5	6	0,33
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1

Tabla 16

Alternativas de implementación del sistema de transmisión de movimiento eje Y.

Implementación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	5	5	11	0,61
Solución B	0	-	5	6	0,33
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1

Al analizar la Tabla 17, se procede a elegir la solución A que es la obtuvo un mayor puntaje en el proceso. Por tanto, se utiliza el sistema de transmisión de movimiento tornillo sin fin-tuerca para el eje Y.

Tabla 17

Deducción en la selección de diseño para el material del sistema de transmisión de movimiento eje Y

Criterio	Costo	Peso	Maquinabilidad	Implementación	Σ	Prioridad
Solución A	0,108	0,083	0,198	0,153	0,542	1
Solución B	0,059	0,153	0,108	0,083	0,403	2
Solución C	0,010	0,014	0,018	0,014	0,056	3
				Total	1,000	

Alternativas de Motores

Los actuadores que generan movimiento en cada uno de los ejes de la impresora y también permiten al extrusor obtener un espacio de trabajo para que se forme la pieza adecuadamente son los motores. y se tiene 2 alternativas de motores.

Una vez determinado el tipo de transmisión de movimiento es necesario elegir el tipo de actuador, cuya principal función es generar un trabajo que permita movilizar al sistema de referencia Y de la impresora 3D para formar la pieza o figura deseada. Para la selección del actuador se consideran 3 alternativas.

Solución A: Motor a Pasos

El motor a pasos utiliza corriente alterna de baja potencia lo que le permite activar bobinas de manera secuencial con un voltaje específico de esta manera se logra que el eje del motor se mueva paso a paso. La velocidad en la que mueva el eje del motor depende directamente de la frecuencia en que las bobinas son activadas, además de que el torque del motor depende de la velocidad a la que gira su eje de rotación. Con los drivers correspondientes se puede controlar la potencia con la regularización del flujo de corriente, además que permitiría de ser el caso obtener una mayor precisión del movimiento reduciendo el paso del mismo. Es muy común verlos instalados en una impresora 3D comerciales.

Figura 28

Motor a pasos NEMA 17



Fuente: (Rd, 2016)

Solución B: Servo Motor

El motor a pasos es utilizado en aplicaciones específicas debido a su alta precisión y estabilidad ante grandes cargas, dependiendo de su potencia es capaz de mantener en suspensión cargas más grandes que cualquier otro tipo de actuador, con una precisión que se mide en grados de rotación su limitante es que trabaja hasta cierto límite de rotación pero hay servo motores como el servo de la Figura 29 que tiene rotación continua pero su control requiere de algo más que un driver eléctrico si no también un software especializado.

Figura 29

Servomotor industrial.



Fuente: (B2B, 2014)

Solución C: Motor DC

El actuador a continuación funciona con corriente continua para controlar su velocidad se debe aplicar distintos niveles de voltaje a sus terminales, los cuales controlan la bobina interna. Si se compra el torque que realiza este motor con otros motores el torque es mínimo, se puede apreciar el motor en la Figura 30.

Figura 30

Motor DC



Fuente: (Place, 2015)

Al describir las propiedades de cada motor, se elige la mejor alternativa toma en consideración las características necesarias que debe tener la impresora 3D.

- Velocidad en el movimiento.
- Facilidad instalación.
- Costo del actuador.
- La mejor precisión

A continuación, siguiendo las etapas del diseño se procede a ponderar los criterios ver Tabla 18 para una selección más acorde a las características técnicas que se planteó anterioridad. En el cual se da un valor más alto al más relevante para este propósito.

Tabla 18

Ponderación de criterios de evaluación para el actuador a utilizar en eje Y.

Criterio	Costo	Peso	Precisión	Control	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo	-	0	2,5	2,5	6	0,18
Peso	5	-	5	2,5	13,5	0,40
Precisión	2,5	0	-	2,5	6	0,18
Control	2,5	2,5	2,5	-	8,5	0,25
				Total	34	1

Luego se procede de la siguiente forma, se evalúa cada solución teniendo en cuenta los criterios propuestos (Ver Tabla 19, Tabla 20, Tabla 21 y Tabla 22), para a continuación de acuerdo con la ponderación alcanzada se selecciona una de las alternativas planteadas anteriormente.

Tabla 19

Ponderación de costos para las alternativas del actuador a utilizar en eje Y.

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	5	0	6	0,33
Solución B	0	-	5	6	0,33
Solución C	5	0	-	6	0,33
			Total	18	1

Tabla 20

Ponderación de peso para las alternativas del actuador a utilizar en eje Y.

Peso	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	5	0	6	0,33
Solución B	0	-	0	1	0,06
Solución C	5	5	-	11	0,61
			Total	18	1

Tabla 21

Ponderación de movilidad para las alternativas del actuador a utilizar en eje Y.

Precisión	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	5	5	11	0,61
Solución B	0	-	5	6	0,33
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1

Tabla 22

Ponderación de implementación para las alternativas del actuador a utilizar en eje Y.

Control	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	5	5	11	0,61
Solución B	0	-	5	6	0,33
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1

Al analizar la Tabla 23, se procede a elegir la solución A que es la obtuvo un mayor puntaje en el proceso. Por tanto, se utiliza el actuador a utilizar es el motor a pasos para el eje Y.

Tabla 23

Conclusión en la selección de diseño para el material del sistema de transmisión de movimiento eje Y.

Criterio	Costo	Peso	Maquinabilidad	Implementación	Σ	Prioridad
Solución A	0,059	0,132	0,108	0,153	0,452	1
Solución B	0,059	0,022	0,059	0,083	0,223	3
Solución C	0,059	0,243	0,010	0,014	0,325	2
Total					1,000	

Sistema 2: Diseño Sistema Mecánico

Modelado de la estructura de la impresora 3D

Para conformar la estructura de la impresora 3D se emplea acoples que nos permitan tener una arquitectura tipo modular.

Se inicia con el diseño de la estructura base que soportará el peso de los elementos que pertenecerán a la impresora 3D ver Figura 31, el soporte debe permitir cualquier disposición en la que se encuentre el extrusor, para ello se analizan los diferentes tipos de soporte y alineamiento con el resto de la estructura.

Figura 31

Base del Robot Manipulador



Se calcula con el peso aproximado de la impresora 3D y sus componentes que es aproximadamente 3kg como viga con 2 apoyos, en el plano y-z. Figura 32 y Figura 33 se obtiene las reacciones:

$$A_y = 14,7N$$

$$M_a = 2,43 Nm$$

Figura 32

Diagrama de cargas en la estructura de la base

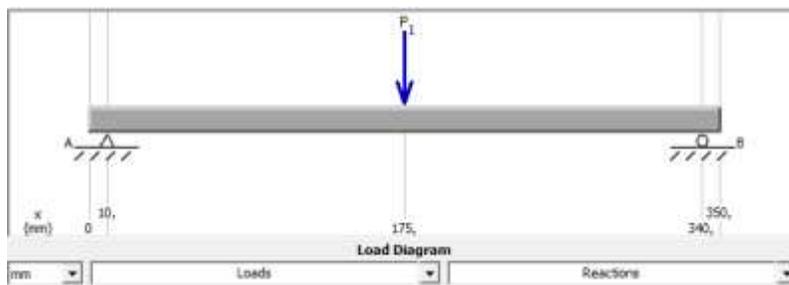
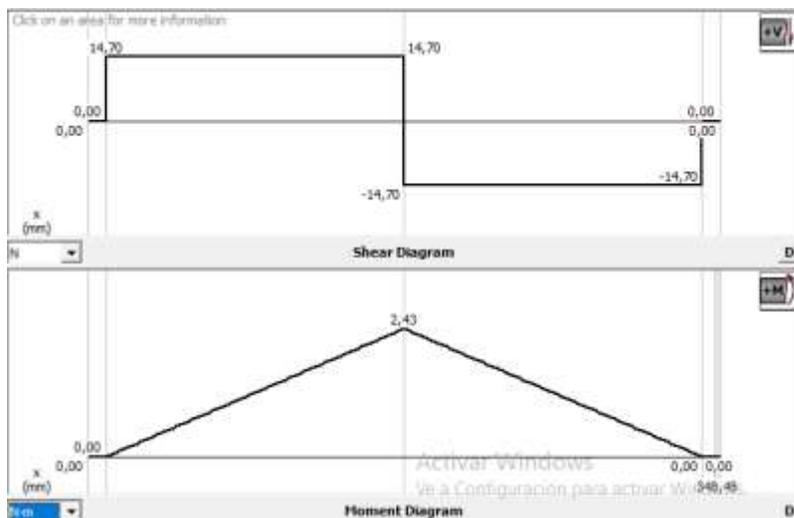


Figura 33

Reacciones y momentos en el plano y-z



De igual manera se muestra las correspondientes reacciones y momentos en el plano x-z en la

Figura 34 y la Figura 35.

Figura 34

Diagrama de cargas en la estructura base plano x-z

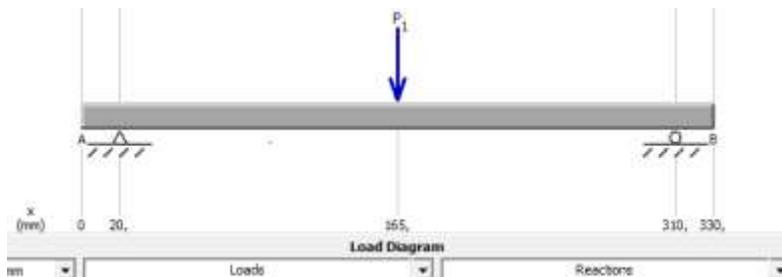
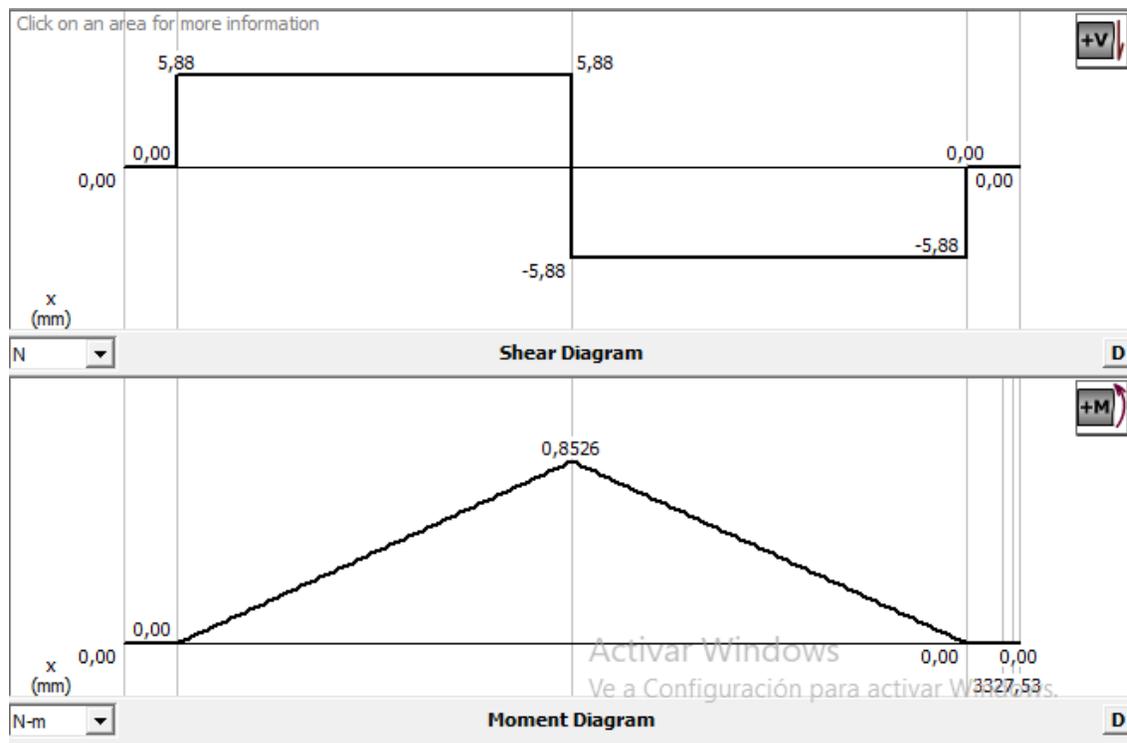


Figura 35

Reacciones y momentos en el plano y-z



$$A_x = 5,88 \text{ N} \quad M = 0,85 \text{ Nm}$$

$$A_x = 5,88 \text{ N}$$

$$B_x = 5,88 \text{ N}$$

$$M_{Ax} = 0,85 \text{ Nm}$$

Es así que se obtiene para el análisis el Momento máximo.

$$M_{m\acute{a}x} = 2,43 \text{ Nm}$$

Con los cálculos realizados se sugiere elegir un perfil ANSI 6061

$$\sigma = \frac{M_y}{i} = \frac{M}{\frac{I}{C}} = \frac{M}{S}$$

$C =$ distancia desde la línea neutra a la base mas lejana

$S =$ módulo de la sección

$$\sigma_{f1 \text{ ANSI 6061}} = 195 \text{ Mpa} = 195 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{admi} = \frac{M}{S}$$

$$\sigma_{admi} = \frac{\sigma_{f1}}{n}$$

$$\frac{M}{S} = \frac{\sigma_{f1}}{n}$$

$$M_{max} = 2.43 \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ m}} = 2430 \text{ Nmm}$$

$$\frac{195 \text{ N/m}^2}{3} = \frac{2430 \text{ N mm}}{S}$$

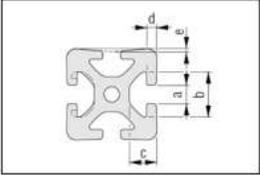
$$S = 0.37 \text{ cm}^3$$

Se selecciona finalmente el perfil estructural de 20 x40 mm y 1.2 mm de espesor, que tiene las características indicadas en la Figura 36.

Figura 36

Características del perfil seleccionado para la estructura de la impresora 3D

Dimensiones de la ranura



	5	6	8	10	12
a	5,0 ^{+0,3}	6,2 ^{+0,3}	8,0 ^{+0,4}	10,0 ^{+0,4}	12,0 ^{+0,4}
b	11,5 ^{+0,3}	16,3 ^{+0,3}	20,0 ^{+0,4}	25,0 ^{+0,4}	30,0 ^{+0,3}
c	6,35 ^{+0,05}	9,75 ^{+0,2}	12,25 ^{+0,3}	15,5 ^{+0,3}	18,3 ^{+0,3}
d	1,8 ^{+0,1}	3,0 ^{+0,25}	4,5 ^{+0,3}	5,3 ^{+0,3}	6,6 ^{+0,3}
e	0,15 ^{+0,1}	0,15 ^{+0,1}	0,2 ^{+0,1}	0,25 ^{+0,1}	0,3 ^{+0,1}

Fuente: (GmbH, 2021)

Para calcular el factor de seguridad se utiliza los datos del perfil de aluminio

Se tiene que $S = 0.50 \text{cm}^3 \times \frac{10^3 \text{mm}^3}{1 \text{cm}^3} = 500 \text{mm}^3$

$$\frac{195 \frac{N}{\text{mm}^2}}{n} = \frac{2430 \text{Nmm}}{500 \text{mm}^3}$$

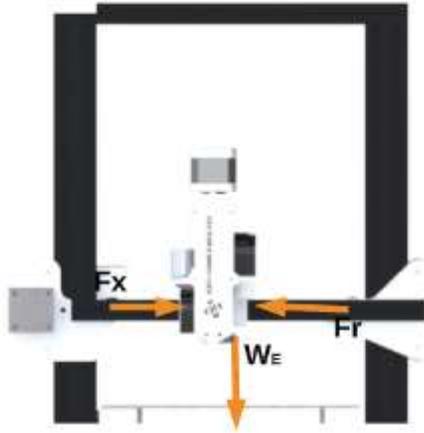
$$n = 4$$

Subsistema de referencia eje X

En el siguiente sistema de referencia se toma en consideración que el extrusor será movido en el eje X por un motor colocado a un extremo como la Figura 37.

Figura 37

Subsistema de referencia eje X



Donde

F_x : Fuerza aplicada para mover el extrusor a través del eje X

F_r : Fuerza de rozamiento : $u = 0,1$

m : Masa a trasladada: 1,2 Kg

v : Velocidad a la que se mueve el extrusor: $0,002 \frac{m}{s}$

$$\sum F_x = ma_x$$

$$F_x - F_r = ma_x$$

$$a_x = \frac{v^2}{2d}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$N = W_e$$

$$F_x = \frac{mv^2}{2d} + uN$$

$$F_x = \frac{1,2 \times (0,002)^2}{2 \times 0,35} + 0,4 \times 1,2 \times 9.8$$

$$F_x = 4,7 \text{ N}$$

Subsistema de referencia eje Y

Figura 38

Subsistema de referencia eje Y



Parámetros:

Masa del carro: 115g

Masa motor Nema 17: 380g

Masa de 150g AISI 304 (acero inoxidable) en el sentido "x" (de izquierda a derecha).

Resistencia a la temperatura del acero laminado en frío AISI 304: 540-740 MPa

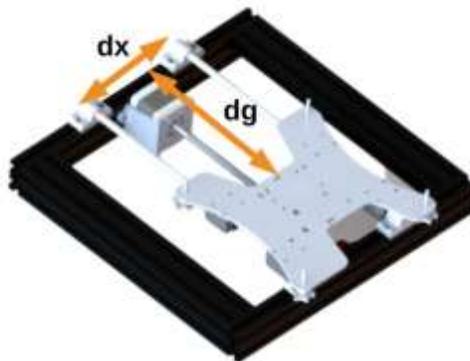
$$F_i = 1 - \frac{d_g}{d_x}$$

Donde:

F_i : Factor de incidencia de la carga con el extrusor

d_g : Distancia más cercana del centro de gravedad al apoyo

d_x : Distancia entre apoyos de los ejes en x



$$F_i = 1 - \frac{25}{128} = 0,8$$

$$Masa_{total} = 115 + 380 + 1200 \times 0,8 + 150 = 1605 \text{ g}$$

$$Fuerza_{total} = Masa_{total} \times g$$

$$Fuerza_{total} = 1,605 \text{ Kg} \times 9,8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 15,73 \text{ N}$$

$$Fuerza \text{ puntual aplicada en los apoyos} = \frac{Fuerza_{total}}{2} = 7,86 \text{ N}$$

Figura 39

Diagramas de cuerpo libre de las fuerzas aplicadas.

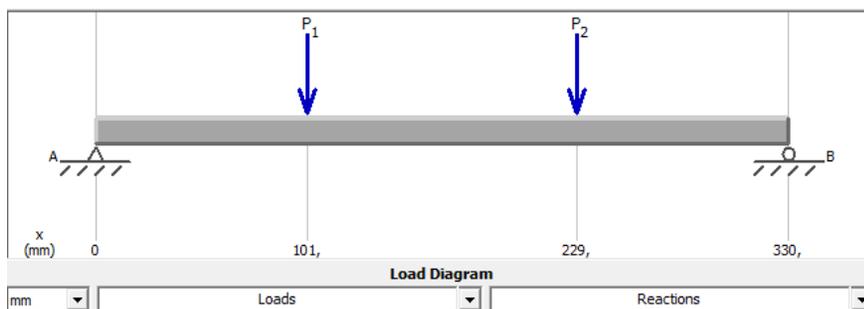
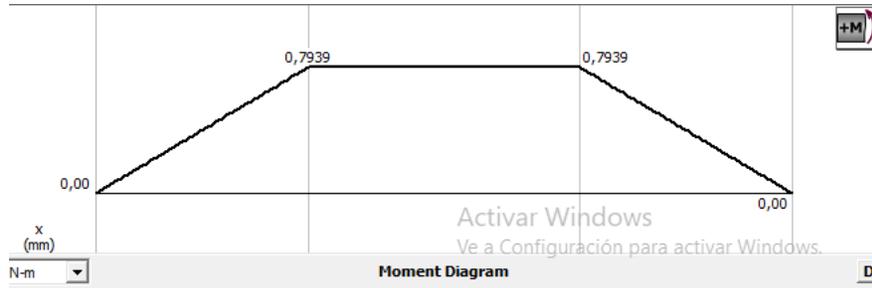


Figura 40

Diagrama de momento flector del eje en dirección Y.



Al realizar el cálculo se utiliza el criterio de Goodman, cuya información se extrae de las ecuaciones 7 - 8 del libro (Budynas & Nisbet, 2008). Con $M_m = T_a = T_m = 0$, Dado que los ejes no están torcidos de ninguna manera, la ecuación puede simplificarse a:

$$d = \left(\frac{32nK_fM_a}{\pi S_e} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Donde:

n : Factor de seguridad = 2

K_f : Factor de concentración de esfuerzos para flexión = 1,7 Tabla(7 – 1) (Budynas & Nisbet, 2008)

M_a : Momento flector en el punto crítico = 1 (Figura 3.28)

S_e : Límite de obstrucción a la tensión en el punto crítico.

S_{ut} : última dificultad para el acero inoxidable AISI 304 = 568MPa (Tabla A – 22)

Se debe acotar que las numeraciones de ecuaciones, tablas y figuras son tomadas del libro (Budynas & Nisbet, 2008)

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

$$k_a = a S_{ut}^b$$

a=4,51 y b=-0,25 tomado de la (Tabla 6-2)

$$k_a = 4,51 \times 568^{-0,265}$$

$$k_a = 0,84$$

$$k_b = 1.24 d^{-0,107}$$

$$k_b = 1.24 \times 8^{-0,107} (\text{Ec. 6 - 20})$$

$$k_b = 0.99$$

Se aplica $k_c = 1$ por estar sometido a flexión de la (Ec.6-26)

$$k_d = k_e = k_f = 1$$

$$S'_e = 0,5 S_{ut} \text{ en donde } S_{ut} \leq 1400 \text{ Mpa de la (Ec. 6 - 18)}$$

$$S_e = 0,84 \times 0,99 \times 0,5 \times 568 = 236,17 \text{ Mpa}$$

$$d = \left(\frac{32 \times 2 \times 1,7 \times 1}{\pi \times 236,17 \times 10^6} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 0,00527 \text{ m} = 5,27 \text{ mm}$$

Al analizar los resultados de los cálculos anteriores se elige el diámetro de 8mm para las guías de acero inoxidable AISI 304, que permite obtener un factor de seguridad mucho mayor al estándar.

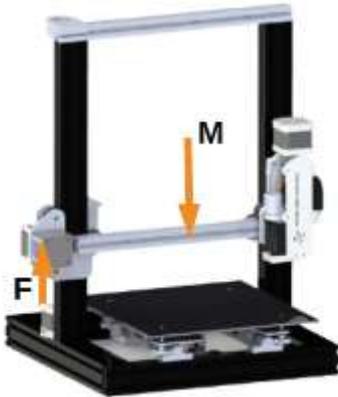
Subsistema de referencia eje Z

Para calcular la fuerza respectiva se analiza que el movimiento en el eje Z sea afectado por la carga máxima colocada a un extremo de la impresora 3D lo que se

soluciona con rodamientos colocados en cada riel para obtener una carga fija en cualquier punto como se ve en la Figura 41.

Figura 41

Diagrama de fuerzas en el eje Z.



Masa que corresponde a la cama de la impresora:

Masa que corresponde al soporte para el movimiento en el eje z: 0,6 kg

Masa de extrusor 1,2 Kg

Torque de motor NEMA 17: 25mNm

Radio de trabajo del tornillo sin fin: 8 mm

Paso del tornillo sin fin: 1.4mm

La masa total a ser movida seria de 1,9 kg

Para calcular la fuerza que se aplica por parte del motor se utiliza la fórmula general

$$F = \frac{T \times \phi \times \theta}{r}$$

En donde:

F: Fuerza de elevación en el eje z

T : Torque del motor Nema 17

\emptyset : Relación de velocidad del tornillo sin fin

r : Radio de trabajo del tornillo sin fin

θ : Porcentaje de trabajo del tornillo sin fin

$$\emptyset = \frac{\pi \times D}{p}$$

Donde

D : Diámetro del tronillo sin fin

p : Paso del tornillo

$$\emptyset = \frac{\pi \times 8mm}{1,4} = 17,95$$

$$F_z = \frac{25 Nm \times 17,95 \times 0,8}{0,004 m} = 89,75 N$$

Sistema 3: Sistema de procesamiento de polímeros

Para cumplir con el objetivo de la extrusión de gránulos de plástico tipo PET se requiere un extrusor capaz de almacenar y procesar los gránulos anteriormente mencionados por lo que los cálculos se enfocan principalmente en el tornillo sin fin que transportará los gránulos a la boquilla. Como se había visto en un estudio previo de las máquinas disponibles y realizadas por diferentes investigaciones es necesaria la utilización de un tornillo sin fin capaz de adaptarse a diferentes diámetros de los gránulos a utilizarse.

Para la carcasa se utiliza la carcasa comercial para una boquilla de una impresora 3D comercial que tiene un diámetro de agujero estándar de 8,4mm.

$$DE_{TH} = d_B \times \frac{96}{100}$$

Donde:

$D_{p_{TH}}$: Diámetro primitivo del transportador helicoidal

d_B : Diámetro de la boquilla

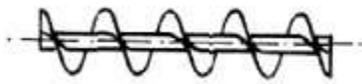
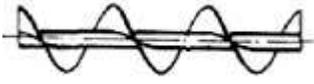
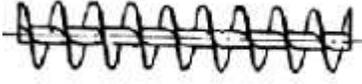
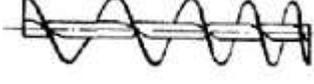
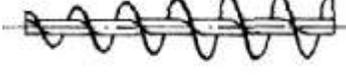
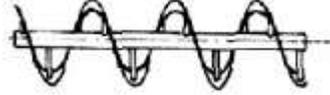
$$DE_{TH} = 8,25 \times \frac{96}{100} = 8 \text{ mm}$$

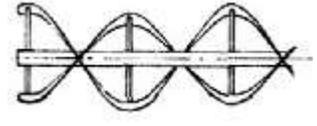
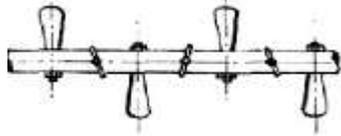
Selección de Tornillo sin Fin

Comercialmente tenemos varios tipos de tornillo sin fin con hélices en la **Tabla 24**

Tabla 24

Tipos de hélices. Fuente: (Rodríguez Galbarro, 2021)

Tipo de Hélice	Tipo de material para transportar/aplicación	Figura
Hélice continua, de paso igual al diámetro	Tipo de hélice normal para transporte de sólidos	
Hélice de gran paso, de 1,5 a 2 veces el diámetro	Se utiliza para productos que fluyen muy bien	
Hélice de pequeño paso, normalmente la mitad del diámetro	Se utiliza en tornillos sin fin inclinados hasta unos 20-25°, o cuando se quiere un prolongado tiempo de permanencia del producto en el transportador con el objeto de enfriarlo, secarlo, etc.	
Hélice de paso variable	Utilizado para compresión de productos, como es el caso de las prensas de tornillo.	
Hélice de diámetro variable	Se utiliza como extractor dosificador de sólidos de tolvas.	
Hélice de cinta	Tipo de hélice adecuada para productos que producen atascamiento.	

Hélice mezcladora, con dos hélices tipo cinta, uno a derecha y otro a izquierda	Se utiliza como equipo mezclador	
Hélice mezcladora, con eje provisto de paletas	Se utiliza como equipo mezclador	

Se elige un paso axial del tornillo sin fin $p_x = 8 \text{ mm}$. por el diámetro calculado anteriormente. Entonces,

$$p_t = \frac{\pi}{p_x} = \frac{\pi}{8} = 0,209 \frac{\text{diente}}{\text{mm}}$$

Donde:

p_t : es el paso diametral tangencial

Usando la ecuación (15-39)

$$a = 0,3183p_x = 2,54 \text{ mm}$$

$$b = 0,3683p_x = 2,95 \text{ mm}$$

La profundidad completa está dada por:

$$h_t = 0,866p_x$$

$$h_t = 6,93 \text{ mm}$$

Se prueba con un diámetro medio del tornillo sin fin $d_m = 2 \text{ mm}$. Entonces,

$$C = \frac{d + D}{2}$$

$$C = \frac{2 + 8}{2} = 5 \text{ mm}$$

$$d_{bajo} = \frac{C^{0.875}}{3} = 1,36 \text{ mm}$$

$$d_{alto} = \frac{C^{0.875}}{1,6} = 2,55 \text{ mm}$$

Entonces al realizar la comparación donde $d_{bajo} \leq d \leq d_{alto}$, está dentro del intervalo.

Se prueba con otro $d=2,5$ mm.

$$C = \frac{2,5 + 8}{2} = 5,25 \text{ mm}$$

$$d_{bajo} = \frac{C^{0.875}}{3} = 1,42 \text{ mm}$$

$$d_{alto} = \frac{C^{0.875}}{1,6} = 2,66 \text{ mm}$$

Entonces al cumplir satisfactoriamente, queda $d_m = 2,5$ mm.

El diámetro interior del tornillo sin fin es:

$$d_0 = d + 2a$$

$$d_0 = 2,5 \text{ mm} + 2 \times 2,54 \text{ mm} = 7,58 \text{ mm}$$

El diámetro de la raíz del tornillo sin fin

$$d_r = |d - 2b|$$

$$d_r = |2,5 - 2 \times 2,95| = 3,4 \text{ mm}$$

El diámetro de la garganta del tornillo sin fin es:

$$D_t = d + 2a$$

$$D_t = 2 + 2 \times 2,54 = 7,08 \text{ mm}$$

La holgura está dada por:

$$c = b - a$$

$$c = 2,95 - 2,54 = 0,41 \text{ mm}$$

El ancho de la cara (máxima) del tornillo sin fin está dado por:

$$F_w \text{máx} = 2 \sqrt{\left(\frac{D_t}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - a\right)^2}$$

$$F_w \text{máx} = 2 \sqrt{\left(\frac{7,08}{2}\right)^2 - \left(\frac{2}{2} - 2,54\right)^2} = 6,37 \text{ mm}$$

Para el número de helicoidales necesarios $N_h = 10$ entonces,

$$L_T = N_h \times p_x$$

$$L_T = 10 \times 8 = 80 \text{ mm}$$

La longitud que tendrá el tornillo sin fin es 80mm:

El material que se va a utilizar es plástico PET reciclado con un diámetro aproximado de 3mm se elige para el diseño un tornillo sin fin tipo Hélice continua, de paso igual al diámetro.

El tornillo sin fin diseñado tiene las características descritas en la Tabla 25.

Tabla 25

Especificaciones del tornillo sin fin

Parte	Medida
Diámetro exterior	8 mm
Diámetro interior	7,58 mm

Longitud T	80 mm
Paso Axial	8 mm
Diámetro medio	2,5 mm
Profundidad	6,93 mm
Ancho de la cara	6,37 mm

Por la selección del tipo de hélice el valor del paso es igual diámetro con una longitud de 100 mm incluida la longitud del agarre con el acople al motor correspondiente como en la Figura 42.

Figura 42

Eje roscado helicoidal continuo.



Las alternativas disponibles cuyas características se describen en Tabla 26.

Tabla 26

Alternativas de material para el eje roscado tipo hélice

Solución	Características
A Acero AISI 1020	-Costo: \$25 - Larga vida útil con grandes cargas -Ideal para trabajar en ambientes industriales -Soporta temperaturas superiores a 220° C.
B Aluminio	-Costo: \$15 -Liviano

	-Ideal para trabajar en ambientes húmedos o secos.
	-Fácil de maquinar
C Impresión 3D	-Costo: \$18
	-Liviano
	-No es resistente a la corrosión
	-Necesita mantenimiento

El diseño es realizado con una ponderación de criterios que optimizan la selección, la Tabla 27 toma en cuenta el criterio más importante.

Tabla 27

Ponderación de criterios de evaluación para el material del eje roscado tipo hélice

Criterio	Costo	Peso	Maquinabilidad	Implementación	$\sum+1$	Ponderación
Costo	-	5	2,5	2,5	11	0,32
Peso	0	-	0	2,5	3,5	0,10
Maquinabilidad	2,5	5	-	2,5	11	0,32
Implementación	2,5	2,5	2,5	-	8,5	0,25
				Total	34	1

Después, se analiza cada modelo utilizando los criterios juicios (ver Tabla 28, Tabla 29, Tabla 30 y Tabla 31) y, finalmente, se elige una de las alternativas en función de la ponderación obtenida.

Tabla 28

Ponderación de costos para las alternativas del material del eje roscado tipo hélice

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	5	0	6	0,33
Solución B	0	-	5	6	0,33
Solución C	5	0	-	6	0,33

Tabla 29

Ponderación de peso para las alternativas del material del eje roscado tipo hélice

Peso	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	5	0	6	0,33
Solución B	0	-	0	1	0,06
Solución C	5	5	-	11	0,61
			Total	18	1

Tabla 30

Ponderación de maquinabilidad para las alternativas del material del eje roscado tipo hélice

Maquinabilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	2,5	5	8,5	0,47
Solución B	2,5	-	5	8,5	0,47
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1

Tabla 31

Consideración de la aplicación de materiales alternativos de eje torcido con helix

Implementación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	2,5	0	3,5	0,19
Solución B	2,5	-	0	3,5	0,19
Solución C	5	5	-	11	0,61
			Total	18	1

Según los datos analizados en la Tabla 32 se prioriza la solución 1 ya que el Acero AISI 1020 soportaría mejor la temperatura sin que tienda a fallar durante las operaciones de extrusión de material.

Tabla 32

Consecuencia de un diseño para el material del manipulador.

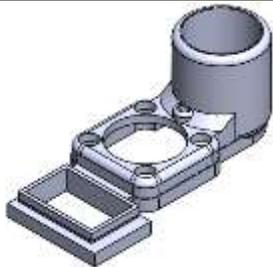
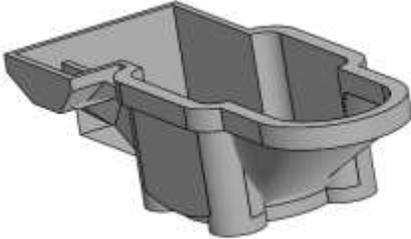
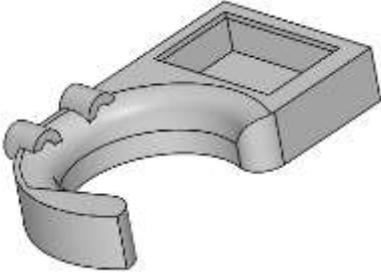
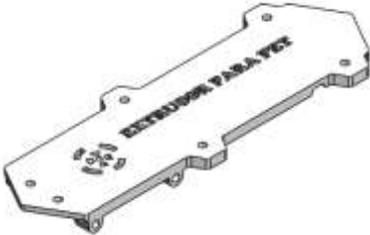
Criterio	Costo	Peso	Maquinabilidad	Implementación	Σ	Prioridad
Solución A	0,108	0,034	0,153	0,049	0,384	1
Solución B	0,108	0,006	0,153	0,118	0,344	2
Solución C	0,108	0,063	0,018	0,083	0,272	3
				Total	1,000	

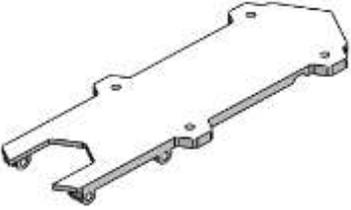
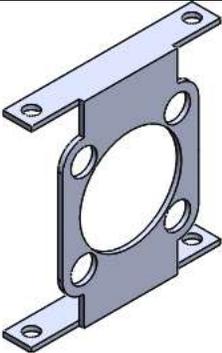
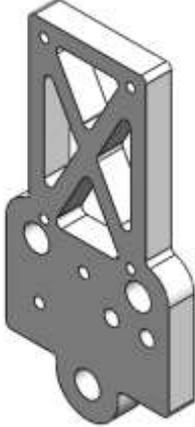
Modelado del extrusor

Se modeló los elementos que conforman el extrusor

Tabla 33

Elementos que conforman el extrusor

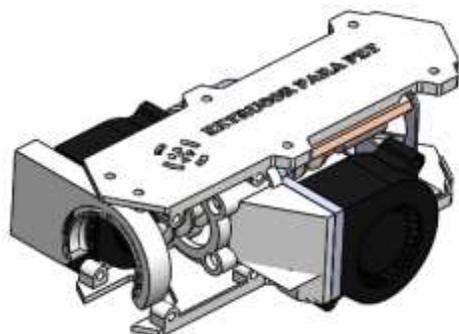
Pieza	Modelo
Alimentador de material	
Soporte del ventilador	
Acople para enfriamiento del extrusor	
Cubierta lateral 1	

Cubierta lateral 2	
Bastidor principal	
Soporte principal con el eje X	

Al ensamblar todas las piezas queda como en la Figura 43.

Figura 43

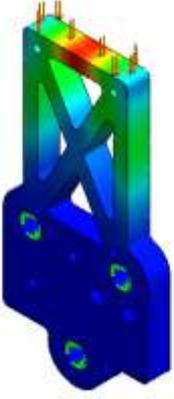
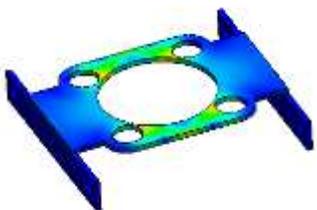
Extrusor para material PET reciclado



Análisis estático de las piezas críticas en el extrusor

Tabla 34

Análisis estático de los elementos de la impresora.

Elemento	Análisis estático
	<p data-bbox="771 1029 1161 1060">Soporte principal con el eje X</p> <p data-bbox="771 1155 1258 1186">Esfuerzo Von Mises: $3.82 \times 10^5 \text{ (N/m}^2\text{)}$</p> <p data-bbox="860 1228 1274 1260">Deformación Unitaria: 9.3×10^{-5}</p> <p data-bbox="771 1302 1323 1333">Desplazamiento Estático: $4.02 \times 10^{-3} \text{ (mm)}$</p>
	<p data-bbox="771 1480 998 1512">Bastidor principal</p> <p data-bbox="771 1617 1274 1648">Esfuerzo Von Mises: $3.069 \times 10^5 \text{ (N/m}^2\text{)}$</p> <p data-bbox="860 1680 1274 1711">Deformación Unitaria: 1.13×10^{-5}</p> <p data-bbox="771 1753 1323 1785">Desplazamiento Estático: $1.18 \times 10^{-6} \text{ (mm)}$</p>

Sistema 4: Sistema de Potencia

Para el movimiento del sistema de impresión 3D se requiere el cambio de posición del extrusor en los 3 ejes X, Y, Z de manera independiente por lo que se procede a calcular la potencia necesaria de los motores de acuerdo a las cargas calculadas anteriormente.

Selección de Motor para el eje X

Como se calculó con anterioridad:

$$F_x = 4,7 \text{ N}$$

Cuyo valor es la fuerza aplicada a la banda

Se calcula el torque que se requiere en el actuador a continuación:

$$\tau_{mX} = F_x \times \frac{d}{2}$$

$$\tau_{mX} = 4,7 \times 0,003 = 0,014 \text{ N.m} = 0,12 \text{ lb-in}$$

Para elegir la banda vamos a catálogo de (Rodríguez Galbarro, 2021) donde buscamos una correa cuya aplicación sea para precisión.

Figura 44

Dimensiones para correas de perfil trapezoidal según normas ISO

Series de perfiles de dientes trapezoidal según ISO/DIS 5296									
Tipo	Paso, P		H mm	h1 mm	B mm	r _o mm	r ₁ mm	Φ (°)	Aplicaciones
	in	mm							
MXL	2/25	2,032	1,14	0,51	1,14	0,13	0,13	40	Precisión
XXL	1/8	3,175	1,52	0,76	1,73	0,30	0,20	50	Extra ligera
XL	1/5	5,08	2,30	1,27	2,57	0,38	0,38	50	Muy ligera
L	3/8	9,525	3,80	1,91	4,65	0,51	0,51	40	Ligera
H	1/2	12,70	4,30	2,29	6,12	1,02	1,02	40	Pesada
XH	7/8	22,225	11,20	6,35	12,57	1,19	1,57	40	Muy pesada
XXH	1/4	31,75	15,70	9,53	19,05	1,52	2,29	40	Extra pesada

Fuente (Rodríguez Galbarro, 2021)

De igual manera se consulta la tensión máxima que se puede aplicar a la correa que es 50N en Tabla 6 de (Rodríguez Galbarro, 2021) lo que es mucho mayor a la fuerza calculada con anterioridad.

Relación de transmisión

Se la calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R = \frac{N}{n} = \frac{D}{d}$$

Donde:

R = es la relación de transmisión

N son las revoluciones por minuto (rpm) de la polea menor:

n son las revoluciones por minuto (rpm) de la polea mayor

D es el diámetro de la polea mayor: 8 mm

d es el diámetro de la polea menor = 6

$$R = \frac{8}{6} = 1,33$$

Según (Rodríguez Galbarro, 2021) se debe calcular la distancia mínima entre las poleas así:

$$E \geq \frac{(R + 1) \times d}{0,2} + \frac{d}{0,1}$$

$$E \geq \frac{(1,333 + 1) \times 6}{0,2} + \frac{6}{0,1}$$

$$E \geq 129,9 \text{ mm}$$

Entonces la distancia que se propuso inicialmente 350 mm cumple con los límites calculados.

Longitud de la correa

A continuación, se calcula directamente con la siguiente expresión:

$$L_p = 2E + \frac{\pi(d + D)}{2} + \frac{(D - d)^2}{4E}$$

Donde:

E es la distancia entre ejes de poleas: 350 mm

$$L_p = 2(350) + \frac{\pi(8 + 6)}{2} + \frac{(8 - 6)^2}{4(350)}$$

$$L_p = 721,99 \text{ mm}$$

Revoluciones de la polea

De acuerdo a (Fallerovo, 2021) la velocidad de impresión estándar es que los ejes tanto X como Y se muevan a una velocidad de 2 mm/s con el cual se realiza lo siguiente:

$$n = \frac{v \times 60 \times 1000}{\pi \times d}$$

Donde:

n: son las revoluciones por minuto del diámetro menor

$$n_x = \frac{0,002 \times 60 \times 1000}{\pi \times 6}$$

$$n_x = 6,36 \text{ RPM}$$

Entonces se calcula la potencia requerida por el motor ya que la polea de menor diámetro va a ser colocada directamente en el eje del actuador mX

$$P_{mX} = \tau_{mX} \times \frac{n_x}{6300}$$

$$P_{mX} = 0,12 \times \frac{6,36}{6300}$$

$$P_{mX} = 1,2 \times 10^{-4} \text{ HP} = 0,89 \text{ W}$$

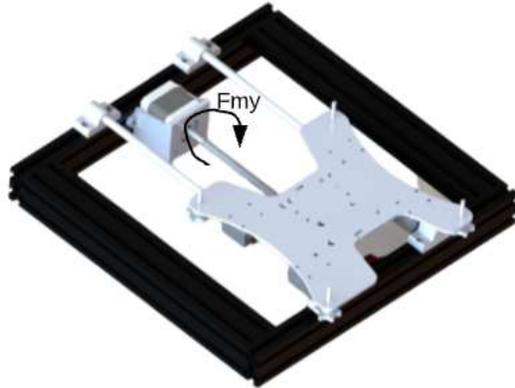
Selección de Motor para el eje Y

$$Fuerza_y = 15,73 \text{ N}$$

La $F_{my} = 15,73 \text{ N}$ que debe ser aplicada para mover la plataforma.

Figura 45

Fuerza del motor aplicada para mover el eje Y



Para determinar el par necesario τ_M para ascender una carga de valor F_{my} usando un tornillo de potencia de rosca cuadrada. (Mott, 2010)

Para encontrar el torque necesario para trasladar la plataforma en el eje Y usando un tornillo sin fin se utiliza la siguiente formula tomada del libro (Mott R. L., 2010).

$$\tau_M = \frac{F_T D_p}{4} \left(\frac{L + \pi f D_p}{\pi D_p - f L} \right)$$

Donde:

D_p : Diámetro primitivo del eje roscado M8: 7,2 mm

L : Avance del tornillo: 1,2 mm

f : Coeficiente de fricción entre accesorio de acople y el tonillo: 0,74

F_s = Factor de seguridad: 1,5

$$\tau_{MY} = \frac{15,73 \times 0,0072}{4} \left(\frac{0,0012 + \pi \times 0,74 \times 0,0072}{\pi \times 0,0072 - 0,74 \times 0,0012} \right)$$

$$\tau_{MY} = 0,22 \text{ N. m}$$

$$\tau_{MY} = 0,022 \text{ N. m} \times F_s$$

$$\tau_{MY} = 0,22 \text{ N. m} \times 1,5$$

$$\tau_{MY} = 0,33 \text{ N. m} = 2,92 \text{ lb} - \text{in}$$

De acuerdo a (Fallerovo, 2021) la velocidad de impresión estándar es que los ejes tanto X como Y se muevan a una velocidad de 2 mm/s por lo tanto y como tenemos una distancia de recorrido total de 147 mm desde el origen a la posición máxima en el eje Y.

$$n = 2 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \times \frac{1 \text{ rev}}{1,2 \text{ mm}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 100 \text{ RPM}$$

Con la velocidad angular se puede calcular la potencia necesaria que se requiere del motor como a continuación:

$$P_{mY} = \tau_{mY} \times \frac{n}{6300}$$

$$P_{mY} = 2,92 \text{ lb. in} \times \frac{100 \text{ RPM}}{6300}$$

$$P_{mY} = 0,046 \text{ HP} = 34,3 \text{ W}$$

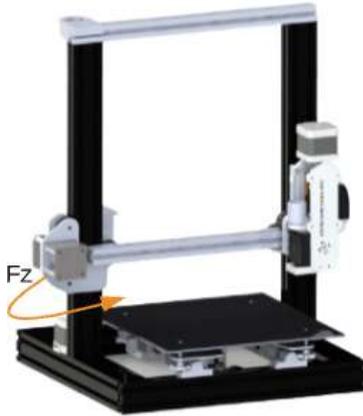
Selección de Motor para el eje Z

$$Fuerza_{ejez} = 89,75 \text{ N}$$

La $F_z = 89,75 \text{ N}$ que debe ser aplicada para mover la plataforma se requiere para que la

Figura 46

Fuerza del motor aplicada para mover el eje Y



Para determinar el par necesario τ_M para subir una carga de valor F_z usando un tornillo de potencia de rosca cuadrada. (Mott, 2010)

Para encontrar el torque necesario para trasladar el extrusor en dirección del eje Z usando un tornillo sin fin, se utiliza la siguiente fórmula tomada del libro (Mott R. L., 2010).

$$\tau_M = \frac{F_T D_p}{4} \left(\frac{L + \pi f D_p}{\pi D_p - f L} \right)$$

$$\tau_{MY} = \frac{89,75 \times 0,0072}{4} \left(\frac{0,0012 + \pi \times 0,74 \times 0,0072}{\pi \times 0,0072 - 0,74 \times 0,0012} \right)$$

$$\tau_{MY} = 0,2 \text{ N.m}$$

$$\tau_{MY} = 0,2 \text{ N.m} \times F_s$$

$$\tau_{MY} = 0,2 \text{ N.m} \times 1,5$$

$$\tau_{MY} = 0,3 \text{ N.m} = 2,66 \text{ lb-in}$$

De acuerdo a (Fallerovo, 2021) la velocidad de impresión estándar es el eje Z se mueva a una velocidad de 1,25 mm/s.

$$n = 1,25 \frac{mm}{s} \times \frac{1 rev}{1,2 mm} \times \frac{60 s}{1 min} = 62,5 RPM$$

Con la rapidez angular se puede calcular la potencia necesaria que se solicita de la máquina como a continuación:

$$P_{mY} = \tau_{mY} \times \frac{n}{6300}$$

$$P_{mY} = 2,66 lb. in \times \frac{62,5 RPM}{6300}$$

$$P_{mY} = 0,026 HP = 19,38 W$$

Selección de Motor para el extrusor

Para la extrusión el fabricante (Fallerovo, 2021) refiere una velocidad 9 mm/s de velocidad de salida de material

$$n = 0,9 \frac{mm}{s} \times \frac{1 rev}{0,8 mm} \times \frac{60 s}{1 min} = 67,5 RPM$$

Con este dato se calcula el caudal a continuación:

$$Q = 0,36 \times \lambda \times \frac{\pi \times D^2}{4} \times \frac{p \times n}{60} \times p \times i$$

Donde:

D: Es el diámetro del canalón del transportador, en m ; 0,008

λ : Es el coeficiente de relleno de la sección; 0,4

p: es el paso del tornillo o paso de hélice, en m; 0,008

n : es la velocidad de giro del eje del tornillo, en r. p. m; 675 RPM

ρ : es la densidad del material transportado, en $\frac{kg}{m^3}$; $2343 \frac{kg}{m^3}$

i : es el coeficiente de disminución del flujo de material debido a la inclinación del transportador.

; 1

$$Q = 0,36 \times 0,4 \times \frac{\pi \times 0,008^2}{4} \times \frac{0,008 \times 67,5}{60} \times 2343 \times 1$$

$$Q = 0,1604 \frac{Kg}{h}$$

Para calcular la potencia total (Rodríguez Galbarro, 2021) recomienda utilizar las siguientes fórmulas.

$$P_{total} = P_H + P_N + P_i$$

Donde:

P_H : es la potencia necesaria para el desplazamiento horizontal del material

P_N : es la potencia necesaria para el accionamiento del tornillo en vacío

P_i : es la potencia necesaria para el caso de un tornillo sin fin inclinado.

La potencia necesaria para realizar el desplazamiento horizontal de los gránulos se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P_H = c_0 \times \frac{Q \times L}{367}$$

Donde:

Q : es el flujo de material transportado, $0,1604 \frac{kg}{h}$

L es la longitud del transportador, 0,1 m

c_0 es el coeficiente de resistencia del material transportado. 1,2

$$P_H = 1,2 \times \frac{0,1604 \times 0,1}{367}$$

$$P_H = 0,52 \text{ W}$$

La siguiente expresión, con alguna aproximación, puede utilizarse para calcular la potencia necesaria para bloquear la rosca de vacío:

La potencia para que el tornillo supere la inercia y empiece a girar se puede aproximar con la siguiente fórmula:

$$P_N = \frac{D \times L}{20}$$

$$P_N = \frac{0,82 \times 100}{20} = 4,1 \text{ W}$$

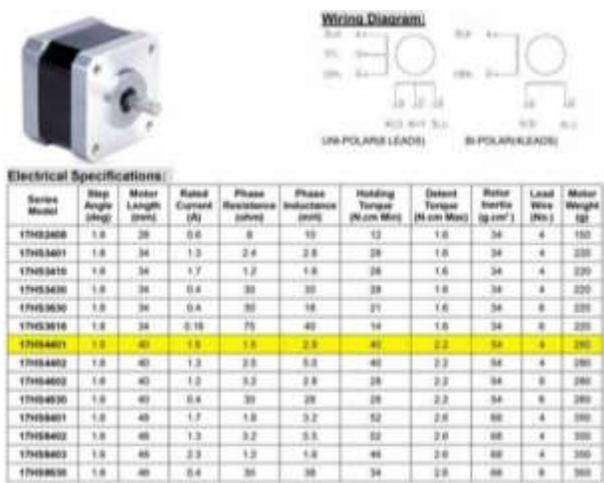
Al no tener un ángulo de inclinación como recomienda el autor se procede a sumar la potencia total a continuación:

$$P_{Ext} = 0,5W + 4,1W = 4,6 \text{ W}$$

De acuerdo a la Figura 47 del Motor Nema 17 cumple con las condiciones de potencia y RPM requeridas así que elegimos de acuerdo a las necesidades de cada actuador:

Figura 47

Motor Nema 17 tipos y tamaños.



Fuente: (Coimbra , 2020)

Selección de Motores para los ejes de movimiento

Tabla 35

Características Técnicas de los motores requeridos y los motores elegidos

Motor	Potencia W	RPM	Motor seleccionado
Motor eje X	0,89	6,36	Nema 17HS3401
Motor eje Y	34,3	100	Nema 17HS4401
Motor eje Z	19,38	62,5	Nema 17HS3410
Motor Extrusor	4,6	67,5	Nema 17HS3616

Sistema 5. Control del Sistema

Para dirigir el sistema completo se utiliza una tarjeta de control que es la encargada de mover el extrusor en los ejes X, Y, Z al controlar el movimiento de los

actuadores, además de leer los valores medidos por los sensores utilizados para el control del sistema.

Tipo de microcontrolador

El microcontrolador es el instrumento que permite realizar el algoritmo de control y básicamente se ocupa de codificar datos de sensores. La optima forma de controlar el sistema es seleccionar el controlador electrónico adecuado.

Tabla 36

Los requerimientos para el microcontrolador

Requerimientos	Descripción
Interfaz SPI y USB	Para comunicación
Al menos 2 entradas Analógicas (AI)	Para lectura de sensores
Al menos 16 salidas Digitales PWM	Para control de motores a paso
Velocidad mínima del reloj	16 MHz

Evaluando los requisitos de la Tabla 36, se decide elegir entre tres tipos de plataformas de desarrollo que pueden cumplir con estos requisitos: Arduino, Raspberry Pi y Odroid. Sin embargo, estas plataformas no son microcontroladores, a pesar de que su tecnología se basa en ellos. Sin embargo, tienen algunas ventajas: son económicos, fáciles de obtener y operan en el medio.

Alternativas de dispositivos de control

Tabla 37 Características técnicas de algunas tarjetas de control comerciales

Creality



MKS base



RAMPS



	Creality	MKS base	RAMPS
Precio	\$70	\$65	\$40
Tamaño	9.9x 7.1 x 2 cm	11.1 x 9.9 x 2.4cm	14.3 x 8.4 x 2.9
Velocidad de reloj	900 MHz	700 MHz	600 MHz
Voltaje de entrada	24 V DC	12 V DC	12-24 V DC
Permite LCD+bocina	Si	No	No
Capacidad	8-12 bits	N/A	8-12 bits
Entradas analógicas			
PWM	12	8	12
Drivers integrados	4	4	0
TWI/I2C	2	1	2
Corriente máxima	5 A	2 A	2.5 A

Analizado las alternativas de la *Tabla 36* se decide adquirir la tarjeta e 3D v1.1.4, debido a que presenta una salida de mayor potencia que las demás, tienen drivers incluidos en las tarjetas, sus características técnicas satisfacen las necesidades establecidas además de poseer mayor capacidad de intercambio de información en las comunicaciones en tiempo real facilitando la lectura de sensores.

Elección del LCD

Para controlar los movimientos, calibrar e imprimir cualquier pieza en con la impresora 3D se requiere una pantalla en donde el usuario interactúe con la máquina, por lo tanto, se busca una pantalla LCD de bajo costo, pero con el suficiente tamaño y resolución para un menú interactivo y fácil de usar.

Según (Klopperman, 2020) la LCD SLCD12864 de Figura 48 cuenta con:

- Pantalla gráfica LCD de 128x64 píxeles
- Tamaño de 78x78x25 mm
- Zumbador
- Botón
- ranura para tarjeta SD

Figura 48

Pantalla LCD SLCD12864



Fuente: (Klopperman, 2020)

La cual gracias a su ranura SD permite ingresar el código G en un archivo para imprimir una pieza sin la necesidad de tenerla conectada a una PC.

Elección de la cama caliente (Heat Bed)

La impresora va a utilizar material reciclado de PET cuyas características es que necesita una temperatura mayor a la del PLA tradicional en la impresión 3D, lo que significa que requiere de una superficie caliente para tener una mejor adherencia durante todo el proceso de construcción de las capas.

Las camas calientes disponibles en el mercado difieren en el tiempo de calentamiento entre sus características.

Según (Jani, 2021) las características de la cama caliente

- Temperatura máxima: 250 ° C
- Tamaño de la placa 215x215mm
- Tiempo para alcanzar los 100 ° C: 80 segundos
- Planitud de 0,8 mm
- Termistor y cables de alimentación 104-GT2 "E3D" precableados
- Almohadilla calefactora de silicona vulcanizada
- Aluminio de 3 mm

Figura 49

Camas con calefacción de alta temperatura

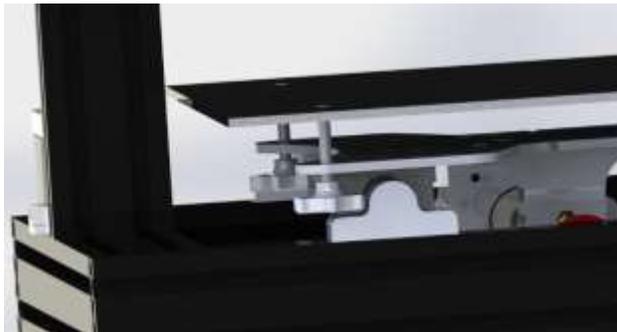


Fuente: (Jani, 2021)

La cama cuenta con agujeros ubicados a cada esquina lo que permite nivelar la cama en sentido horizontal, con unas perillas como los de la Figura 50 diseñadas específicamente para el modelo de soporte del eje Y

Figura 50

Perilla de nivelación de plataforma



Elección de sensores de temperatura

Para medir la temperatura del extrusor y de la cama se necesitan sensores que soporten temperaturas superiores a 240 °C, pero con una precisión de 0,2°C, lo que permite analizar el uso de termistores de 100K, que son elementos que tienen un alto rango de cambio en su resistencia con un cambio mínimo de temperatura.

Las características del termistor Pt100 según (Lauge, 2021) son las siguientes:

- Presición $\pm 1^{\circ}\text{C}$
- Resistencia 100 kOhms
- Embalaje de vidrio 2mm
- Largo de 32mm
- Rango de temperatura – 50 a 260 °C

Figura 51

Sensor NTC 100Kohms



Fuente: (Lauge, 2021)

Elección de la Fuente de Energía

Para la alimentación de los componentes de bajo uso de corriente como motores y sensor de fin de carrera se puede asumir que se necesita una fuente común de 12 V, lo que se toma en cuenta para la fuente es los elementos de calentamiento tanto del extrusor como el de la cama que requieren de una corriente superior a los 6 A que al funcionar juntos nos consumen una potencia superior a los 240 W.

Por lo tanto, se elige una fuente de 350 W que es suficiente para alimentar a todo el circuito incluido sus actuadores cuyas características según (Tangtou, 2018) se describen a continuación:

- *Rango de voltaje: 90 – 132VAC Por interruptor*

- *Frecuencia: 47 – 63HZ*
- *Sobretensión: 13,8 – 16,2 V*
- *Potencia: 24 V 14,6 A 350 W*
- *Configuración, tiempo de subida: 1300ms, 50ms / 115VAC a plena carga*
- *Tamaño: 215 × 115 × 30 mm*

Figura 52

Fuente de alimentación Maxwell LRS-350



Fuente: (Tangtou, 2018).

Aplicación de Softwares para control

Se requiere la elección del software necesario para el control y funcionamiento óptimo del sistema de impresión, cuyas funciones se deben adaptar al sistema implementado, para lo cual se utiliza un firmware de acceso libre, se encuentra varias opciones de las cuales se elige Repetier-Host que permite modificar las funciones básicas de cualquier impresora o CNC del firmware de manera online como se menciona en (Repetier, 2020).

Una vez hecha los cambios básicos se descarga el archivo resultante para proceder a adaptar las funciones específicas necesarias.

A continuación, abrimos el archivo “Configuration.h” como se en la Figura 53 en donde se encuentra las configuraciones iniciales del firmware en cuyo archivo se comienza con la modificación del código fuente.

Figura 53

Firmware inicial como parámetros default



Ya identificado las líneas a modificar se analiza los valores cuyo contenido será reemplazado.

Para la impresora en General:

`#define NUM_EXTRUDER 3.` – El extrusor a usarse está conectado al PIN E0 por lo tanto se modifica esta línea a E0.

`#define MOTHERBOARD 33.` - El número 33 es utilizado para impresoras que usan tarjetas RAMPS 1.3, o RAMPS 1.4, esta será cambiada a creality porque es el modelo de impresora en la que se basa el actual sistema.

`#define DRIVE_SYSTEM 0.` - Se pone en cero por ser el número que

representa a un sistema cartesiano de ejes xyz, con motores independientes,

`#define BELT_PITCH 2.` - En esta línea se coloca el valor del paso de la correa dentada utilizado, cuyo valor es 1,2 es el caso del sistema implementado.

#define XAXIS_STEPS_PER_MM 160.- En el caso particular para el eje X para mover el extrusor se debe mover el eje del motor a pasos específicos cuyo valor será calculado a continuación:

x_d : numero de dientes del engrane del motor: 20

P_c Paso del a correa dentada: 2 mm

Resolucion del motor NEMA17: 1,8 grados

Micro stepping driver tarjeta creality: 1/16

Se calcula el desplazamiento por vuelta d_v

$$d_v = x_d P_c$$

$$d_v = 20 \times 2 = 40 \text{ mm/vuelta}$$

Pasos del motor por vuelta m_v

$$m_v = \frac{360^\circ/\text{vuelta}}{1.8^\circ/\text{paso}} = 200 \frac{\text{pasos}}{\text{vuelta}}$$

Pero debido al driver se calcula.

$$m_v = \frac{200 \text{ pasos/vuelta}}{\frac{1}{16}} = 3200 \frac{\text{pasos}}{\text{vuelta}}$$

Una vez realizado el cálculo, se encuentra el valor para los pasos por mm del eje X

$$P_{mx} = \frac{3200 \frac{\text{pasos}}{\text{vuelta}}}{40 \frac{\text{mm}}{\text{vuelta}}} = 80 \frac{\text{pasos}}{\text{mm}}$$

De esta manera definimos los pasos para los demás ejes:

$$P_{my} = 80 \frac{\text{pasos}}{\text{mm}}$$

$$P_{mz} = 400 \frac{\text{pasos}}{\text{mm}}$$

Finalmente se puede apreciar el resultado de la Figura 54 en la pantalla LCD:



Figura 54 Pasos por milímetro de todos los ejes mostrados en la pantalla LCD

Para el extrusor 0.

`#define X_MIN_POS 0`.- El extrusor se debe colocar al origen del eje X

`#define Y_MIN_POS 0`.- El extrusor se debe colocar al origen del eje Y

`#define Z_MIN_POS 0`.- El extremo del extrusor se debe colocar al origen del eje Z

`#define EXT0_STEPS_PER_MM 98`.- Es el número de pasos por milímetro

de desplazamiento del filamento por el extrusor 0, obtenido de (Buter, 2016)

`#define EXT0_TEMPSENSOR_TYPE 1`.- El número 1 representa a un termistor de 100K.

`#define INVERT_E0_DIR true`.- Se coloca la palabra true, para no invertir el sentido de giro del motor del extrusor.

Una vez hecho los cambios se debe bootear a la tarjeta creality ya que solo así se puede cargar cualquier programa. Para aquello seguimos los pasos de (Ortega, 2020)

Una vez convertida la tarjeta a un dispositivo booteable, procedemos a cargar el firmware previamente modificado como en la Figura 55.

Figura 55

Carga del firmware a la tarjeta creality 3D



Se debe denotar que, aunque la tarjeta cuenta con un microprocesador Atmega se debe tratarla como una tarjeta tipo sanguino, que es la firma compatible con la misma.

Control de temperatura

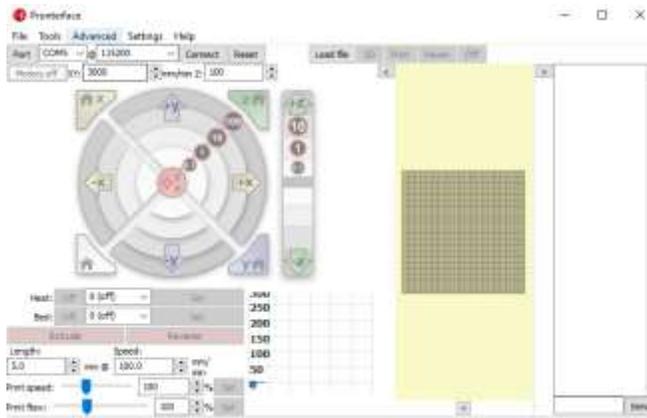
Como el extrusor para polímeros reciclados se trata de un sistema diferente a lo que habitualmente se acostumbra a usar para imprimir en 3D, es necesario sintonizar el PID.

Para aquello seguimos las recomendaciones de (Balears, 2020)

En donde usamos el programa Print run ver Figura 56 conectada a la tarjeta lo que nos permite sintonizar el PID.

Figura 56

Software para sintonizar el PID de una impresora 3D



Cuyo procedimiento es el siguiente:

Una vez que la impresora se ha conectado a nuestro ordenador a través del software, podemos enviar comandos al terminal.

Conectamos la tarjeta creality al computador mediante cable mini-USB, enseguida conectamos el extrusor a la tarjeta, esto último lo hacemos para asegurar que la temperatura del extrusor comience en temperatura sea la misma que la del ambiente.

A continuación, conectamos la tarjeta a la fuente de energía.

Una vez todo listo procederemos con estos tres pasos:

- M503 para obtener los valores actuales guardados en la EEPROM
- M106 S255 para poner el ventilador de capa al 100%
- M303 E0 S215 C8 este comando ejecuta el script interno para calibrar en 8 ciclos (C8) como mantener la temperatura a 215° (S215) de nuestro extrusor (E0)

Al obtener los valores de kp, ki, kd solo queda garbarlos en la tarjeta, es decir cargarlos a la memoria Eprom para eso se utiliza los siguientes comandos:

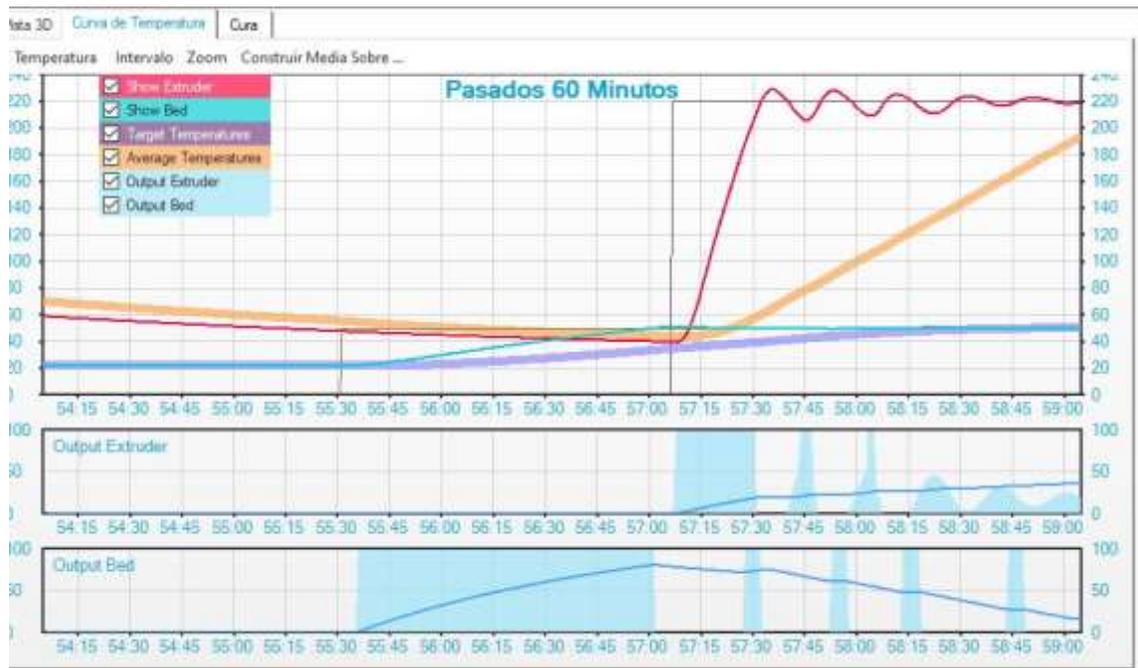
- M301 P7.21 I0.77 D16.84 sustituye por tus valores p, i y d

- M500 guarda de forma definitiva en la maquina

Una vez calibrados los parámetros del control PID probamos el calentamiento del extrusor a la temperatura de 250° C como se ve en la Figura 57.

Figura 57

Calentamiento del extrusor con control PID



Descripción del Software generador del código G e interfaz gráfica para la PC (Repetier host 2.2)

AL analizar las distintas alternativas del software a utilizarse para las pruebas respectivas del extrusor para polímero PET reciclado, se requería de un software bajo licencia libre de fácil manipulación y con las herramientas necesarias para manipular los parámetros necesarios para una impresión óptima del nuevo sistema.

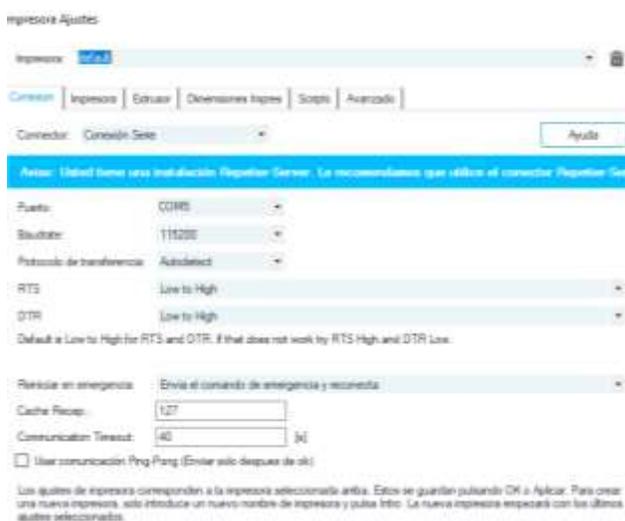
Se utiliza Repetier Host un programa que se los puede descargar gratuitamente de (<https://www.repetier.com/>)

Modificación del tipo de impresora y demás parámetros importantes

Al iniciar el programa se requiere reconocer el tipo de conexión a la tarjeta creality al conectar la tarjeta inmediatamente reconoce el puerto COM que se encuentra activo, los demás parámetros quedan por default al no requerir una conexión especial.

Figura 58

Conexión serial de la tarjeta a la PC



Los parámetros para el movimiento manual son importantes ya que se debe elegir valores mucho mas bajos que los que se usa para imprimir, y es la etapa de calibración y corrección de movimientos mecánicos de todos los ejes.

Figura 59*Ajustes para el movimiento manual de la Impresora 3D*

Impresora Ajustes

Impresora: default

Conexión: **Impresora** | Extrusor | Dimensiones Impres. | Scripts | Avanzado

Printer Type: **Adwin32**

Velocidad Desplazamiento en el eje X: 4000 (mm/min)

Velocidad Avance del Eje Z: 100 (mm/min)

Manual Extrusion Speed: 2 (mm/s) | 30 (mm/s)

Manual Retraction Speed: 30 (mm/s)

Temperatura precalentamiento Extrusor: 250 °C

Temperatura precalentamiento Plataforma: 55 °C

Comparar Temperatura de Extrusor y Plataforma

Eliminar comando M105 del Registro

Comprobar cada 2 segundos: 00

Posición de Reposo: X: 0 Y: 0 Z: 0 (mm)

Send ETA to printer display Ir a posición de reposo después de imprimir o andar

Apagar Extrusor al terminar o andar Apagar Plataforma al terminar o andar

Apagar Motores al terminar o andar Print to SD card

Añadir tiempo de impresión: 0 (s)

Invert Direction in Control for: X-Axis Y-Axis Z-Axis Rp X and Y

Las dimensiones de la impresora van de acuerdo a los puntos máximos respecto al origen que el extrusor puede alcanzar.

Figura 60*Determinación de los valores del área útil de impresión*

Impresora: default

Conexión: **Impresora** | Extrusor | **Dimensiones Impres.** | Scripts | Avanzado

Printer Type: **Impresora cartesiana**

Reposo X: 0 Reposo Y: 0 Reposo Z: 0

X Min: 0 X Max: 200 Coord. X Plat: 0

Y Min: 0 Y Max: 200 Coord. Y Plat: 0

Anchura área de impresión: 200 mm

Profundidad área de impr: 200 mm

Altura área de impresión: 100 mm

Los valores de inicio y máximo definen el rango de coordenadas del extrusor. Estas coordenadas pueden ser negativas y salir de la

Rollos en autoalimentación: 0 mm

Diagrama de la zona de impresión:

El diagrama muestra un eje vertical etiquetado como 'Y Máx' y un eje horizontal etiquetado como 'X Máx'. Una zona rectangular sombreada, etiquetada como 'E', representa el área útil de impresión. Las dimensiones de esta zona están etiquetadas como 'c' (anchura) y 'E' (profundidad).

En esta modificación se toma en cuenta los valores calculados, pues, las velocidades alcanzadas del extrusor en todos los ejes deben ser similares a los valores que el código G genere.

Figura 61

Parámetros de velocidad para la generación del código G

	Lento	Rápido	
Inyección:	40	60	[mm/s]
Travel:	150	150	[mm/s]
Winer Capa:	30	30	[mm/s]
Perímetro Exterior:	30	60	[mm/s]
Perímetro Interior:	40	80	[mm/s]
Relleno:	60	100	[mm/s]
Skin Infill:	30	60	[mm/s]

En este caso especial se tiene en cuenta el caudal máximo, calculado en el diseño del extrusor, tomando en cuenta estos valores se realiza una relación directa para el valor del diámetro del filamento requerido en esta ventana.

Figura 62

Parámetros del filamento a usarse para imprimir

Filamento	
Diametro de Filamento:	1.2 [mm]
Flow:	100 [%]
Temperatura	
Print Temperature:	220 [°C]
Bed Temperature:	50 [°C]
Refrigeración	
Min. Fan Speed:	50 [%]
Max. Fan Speed:	100 [%]
Minimum Layer Time	5 [s]

Accionamiento de los actuadores mediante la interfaz gráfica

El control manual de la impresora es importante ya que solucionamos movimientos erróneos antes de imprimir además de la prueba de funcionamiento de los sensores de posición inicial.

La nivelación de la cama se facilita al poder moverla en cualquier dirección y ajustar con las perillas correspondientes, sin requerir cargar ningún software o función especial.

Figura 63

Mando para el control manual de la impresora



Se puede controlar el calentamiento del extrusor de manera segura, siempre con la verificación visual de que se encuentra en una posición que no compromete la integridad de algún componente de la máquina.

Visualización 3D y características de las piezas a imprimir.

El software Repetier Host permite que usuario cargue un modelo en formato STL el cual es utilizado de manera general en cualquier terminal de este tipo.

El programa muestra el modelo en 3 dimensiones, para imprimir el programa cuenta con las siguientes herramientas:

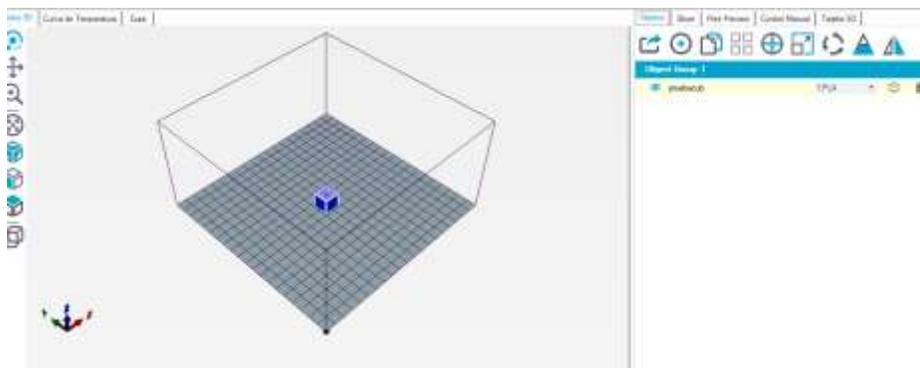
Vista de objetos

La vista de objetos permite al usuario cambiar de posición, rotar duplicar etc. Al objeto que se va a imprimir lo que facilita de gran manera elegir la forma adecuada de impresión de la pieza, ya que muchas veces hay piezas que por su complejidad se deben imprimir desde cierta posición para generar buenos acabados y soportes resistentes.

Así mismo se tiene la posibilidad de colocar múltiples piezas para aumentar la eficiencia en la impresión 3D.

Figura 64

Ventana vista de objeto



Una vez colocada la pieza o su conjunto en posiciones adecuadas, se procede a generar el código G con la herramienta CuraEngine, que no es más que un codificador de Código en lenguaje G ,para que le impresora siga los movimientos caluados por el programa e imprimir la pieza 3D requerida.

Figura 65

Ventana para la generación del Código G



Impresión con la máquina en 3D

El archivo en código G fue generado exitosamente, a continuación solo quedan dos alternativas las cuales son:

- Guardar el archivo generado en un tarjeta micro-SD
- Imprimir el archivo generado directamente desde el terminal Repetier

Figura 66

Ventana para imprimir o guardar el código G generado



De cualquiera de las 2 formas la máquina empezará a imprimir la pieza o conjunto requerido en el tiempo previsto durante la generación del código G ver Figura 67.

Figura 67

Impresión de piezas de prueba

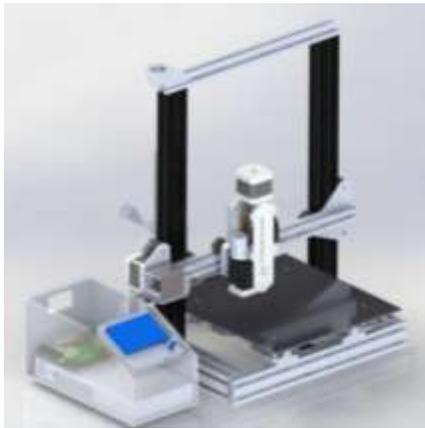


Concepto Final

Como concepto final de la figura se propone una impresora tipo cartesiana, cuyo volumen de trabajo es de 14x20x25 cm, con un extrusor especial para esferas de polímero PET reciclado con una caja de control con un menú interactivo en la pantalla LCD.

Figura 68

Concepto final sistema de impresión de polímero PET reciclado



Construcción e Implementación

Analizando los requisitos de la Tabla 36, se decide elegir entre tres tipos de plataformas de desarrollo que pueden cumplir con estos requisitos: Arduino, Raspberry Pi y Odroid. Sin embargo, estas plataformas no son microcontroladores, a pesar de que su tecnología se basa en ellas. Sin embargo, tienen algunas ventajas: son baratos, fáciles de obtener y operan en el medio.

Construcción de la base

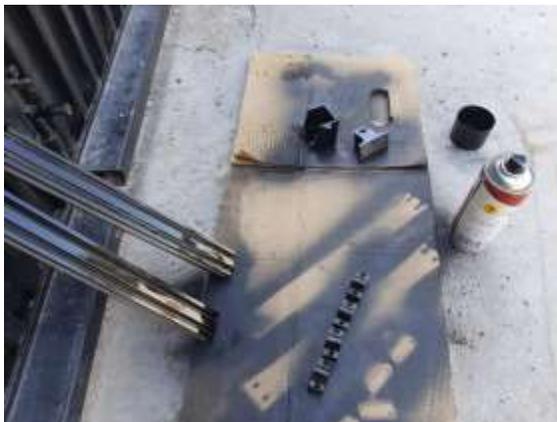
Con ayuda del diseño inicial se inicia cortando los perfiles de aluminio correspondientes Figura 69.

Figura 69

Soldado de los perfiles para conformar la estructura base



Se realiza los respectivos agujeros que permiten fijar la base del bastidor del robot manipulador y pintar la estructura.



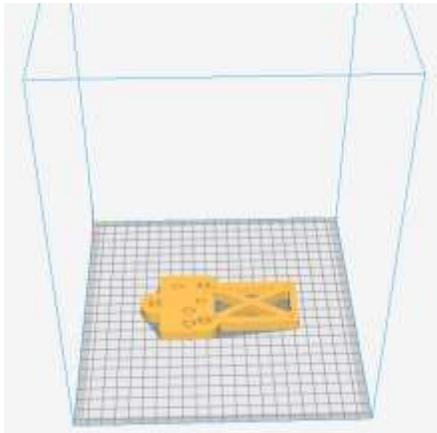
Construcción y ensamblaje del bastidor del robot manipulador

Las partes necesarias de la estructura se imprimen con polímero PETG que permite familiarizar el material con el que se realiza las pruebas de comparación.

La mayoría de piezas no soportan una carga predominante, por lo tanto, se imprimen con un relleno inferior al 20%, a continuación, se genera el código G Figura 70 de las mismas para imprimirlas.

Figura 70

Pieza generada el código G para imprimirla en 3D



Las piezas son impresas utilizando la impresora ENDER 3 14

Después de que las piezas se hayan impreso, debemos identificarlas para poder montarlas (véase la figura 72).

Figura 71

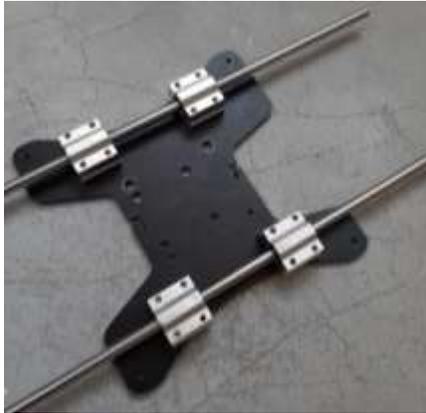
Impresión de las piezas base en impresora 3D



Una vez colocados los rodamientos lineales se prueba el juego de los ejes lisos para mantener una holgura precisa que no afecte en su movimiento.

Figura 74

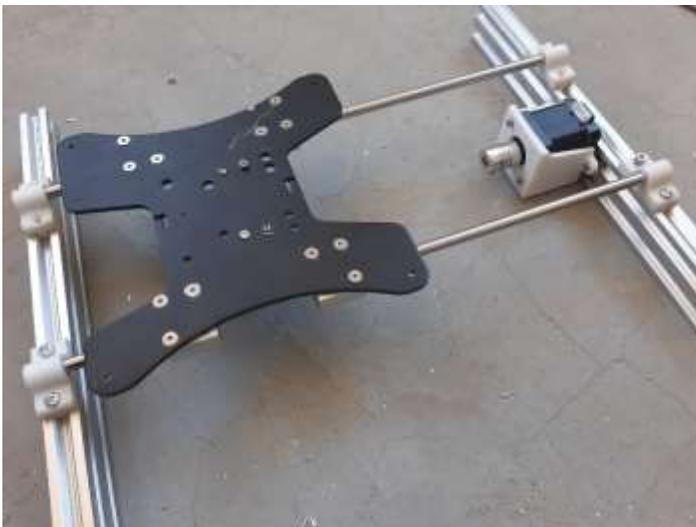
Perfil de aluminio como eslabón



Ya probado la holgura colocamos en los eslabones de aluminio Figura 75 que servirán de soporte y a toda la plataforma del eje Y.

Figura 75

Construcción de la base soporte de la plataforma eje Y



De la misma forma se acopla las piezas para los ejes X y Z

Figura 76

Manipulador realizado en corte láser



Construcción del Extrusor

El extrusor es uno los elementos más importantes del sistema, su implementación debe estar acorde a las dimensiones de los ejes X, Y, Z.

Se procede a armar el extrusor iniciando por el motor a pasos que hará que funcione correctamente colocando un acople para que ajuste con el tornillo sin fin ver Figura 77.

Figura 77

Conexión del motor al eje principal



A continuación, se coloca las piezas en 3D que son las encargadas de sujetar los disipadores de calor encargados de controlar la temperatura de la boquilla.

Figura 78

Fijación del eje roscado a la base del extrusor



Se coloca la boquilla de donde sale el material junto con su respectivo sensor de temperatura y la niquelina que calentara el entorno.

Figura 79

Montaje de los sensores y la niquelina junto a la boquilla del extrusor



Ya hecho el montaje, queda poner los ventiladores cooler fan de 12V que controlan la temperatura de la boquilla para un control eficiente del calentamiento del extrusor.

Figura 80

Implementación de ventiladores en el extrusor



Implementación del sistema de Extrusión de PET reciclado

Una vez armado todas las partes del extrusor se lo procede a montar en el espacio correspondiente del eje X para realizar las pruebas manuales de movimiento.

Figura 81

Extrusor de polímero PET reciclado

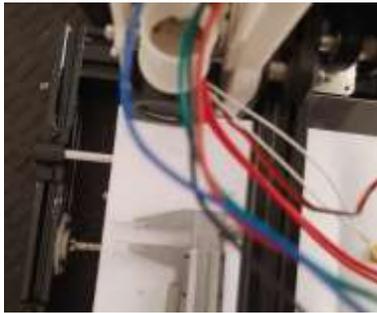


Calibración

Antes de cualquier prueba de impresión se procede a probar los movimientos de los ejes X, Y utilizando el software de control y mover 1cm como en la Figura 82.

Figura 82

Pruebas de movimiento en el eje X

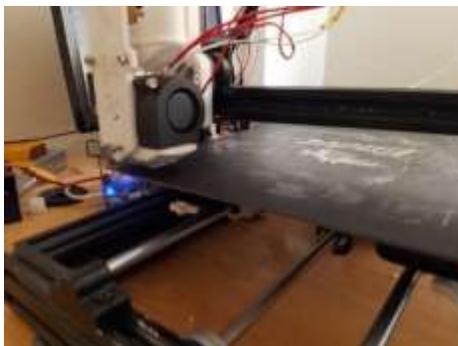


Para el eje Z es algo diferente ya que se utiliza el método de calibración de la plataforma según (Silva, 2021)

En donde básicamente se tiene que mover el extrusor en varias posiciones dentro del área de impresión en el la plataforma ver Figura 83 y colocando una hoja hasta que entre en los mismos, de manera que sea difícil mover la hoja en cada punto previsto.

Figura 83

Calibración de la cama de la impresora 3D con extrusor.



así mismo, se prueba que los sensores de posición inicial funcionen correctamente.

Calibración del Extrusor de PET reciclado

Ya probado los movimientos de los ejes principales de la impresora 3D, queda la calibración del extrusor de PET reciclado que se lo hace de la siguiente manera:

- Calentar el extrusor a una temperatura entre 210 y 220 °C
- Mover con control manual utilizando el software de prueba
- Analizar la cantidad de material que es extruido

Figura 84

Calibración del Extrusor



Una vez calibrado la cantidad de material que fluye a través de la boquilla del extrusor, se procede a realizar pruebas de impresión con las que se obtuvo los resultados de la Figura 85.

Figura 85

Pruebas de calibración



Pruebas y resultados

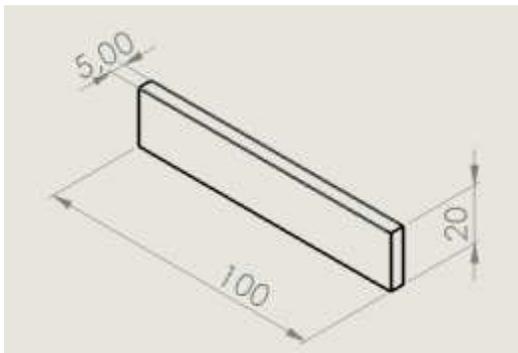
Pruebas

En base a los objetivos planteados inicialmente se procede a realizar pruebas de las probetas impresas en 3D, capacidades de impresión, velocidades en las que la impresora imprime a un máximo rendimiento.

Para lo cual se diseñó probetas de las siguientes dimensiones de la Figura 86.

Figura 86

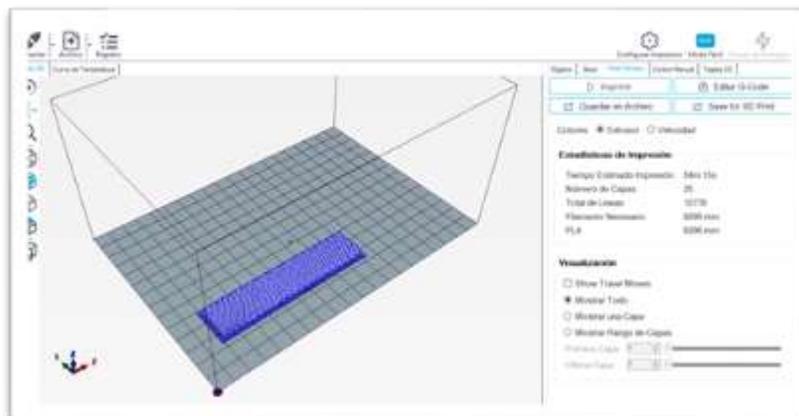
Probeta para las pruebas de impresión



Después una vez convertido el modelo a formato STL, se usa el software correspondiente que permite obtener el código G de la Figura 87.

Figura 87

Obtención del código G para la probeta de prueba



Se realiza el procedimiento anterior, pero con la diferenciación está en el cambio de relleno para cada impresión como se especifica en la Tabla 38.

Tabla 38

Especificaciones de las probetas impresas

Probeta N°	Tipo de Extrusor	Relleno (%)	Tiempo de Impresión (min)
1	Comercial ENDER V3	25	24
2	Modelo PET V1	25	32
3	Comercial ENDER V3	50	29
4	Modelo PET V1	50	35
5	Comercial ENDER V3	75	34
6	Modelo PET V1	75	45
7	Comercial ENDER V3	100	54
8	Modelo PET V1	100	68

Pruebas de metrología

Una vez impresas las probetas se procede a la medición como la Figura 88.

Figura 88

Medición de las probetas a) Altura b) Ancho c) Largo



A continuación se analiza las mediciones de las probetas en la Tabla 39 con sus diferentes valores de relleno.

Tabla 39

Mediciones y errores de las probetas de prueba

Infill (%)	Mediciones					Error relativo						
	Altura (mm)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura	Ancho	Largo	Altura	Ancho	Largo
	Impresora Comercial		Impresora tesis			Impresora Comercial			Impresora Tesis			
25	5,05	20,14	100,5	5,18	20,4	101,9	1,0%	0,7%	0,5%	3,6%	2,0%	1,9%
50	5,03	20,12	100,56	5,15	20,3	102,1	0,6%	0,6%	0,6%	3,0%	1,5%	2,1%
75	5,04	20,16	100,47	5,15	20,5	102,2	0,8%	0,8%	0,5%	3,0%	2,5%	2,2%
100	5,06	20,11	100,8	5,19	20,7	102,4	1,2%	0,5%	0,8%	3,8%	3,5%	2,4%

Al ver los resultados de las mediciones se determina que las probetas pasan las pruebas de longitudes ya que se encuentra un error máximo de 3,8% que se encuentra dentro del porcentaje máximo admisible.

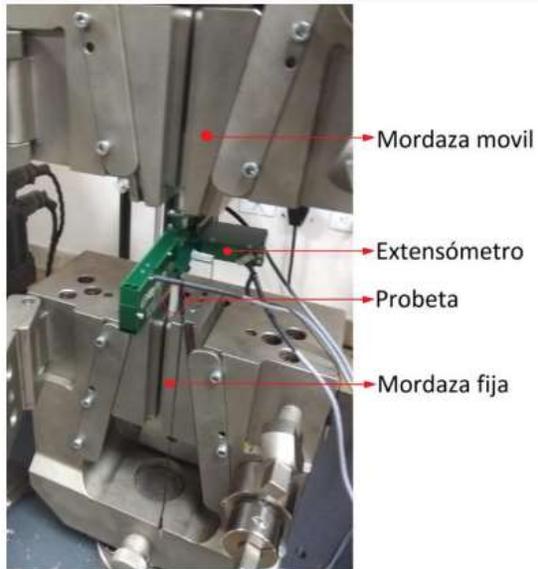
Pruebas de propiedades mecánicas

Se realiza un ensayo de tracción en la máquina Universal como el de la Figura 89 Máquina de ensayos universales , del laboratorio de Ensayos mecánico de materiales perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas

El objetivo es aplicar fuerzas a los extremos de la probeta a utilizar, en cuyo caso se obtiene al final una gráfica y datos que permiten calcular propiedades mecánicas el Limite Elástico, Esfuerzo de rotura y demás.

Figura 89

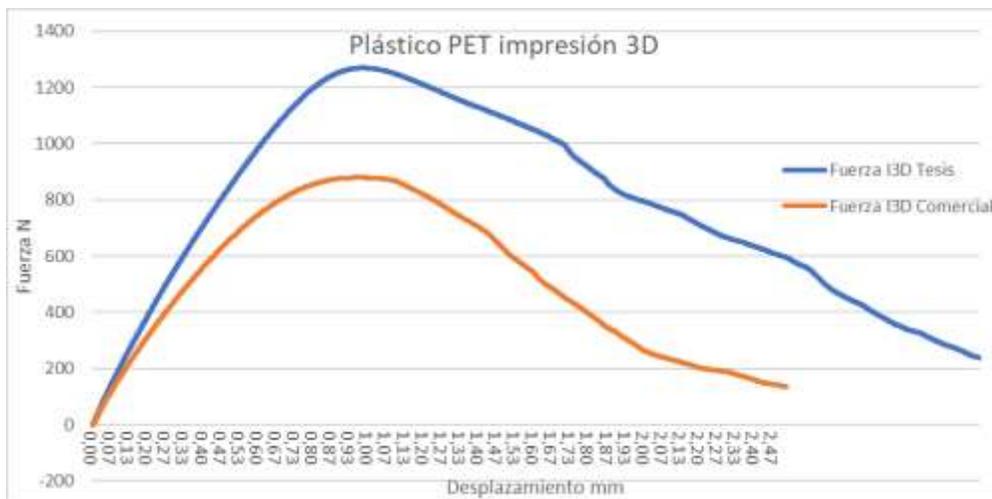
Máquina de ensayos universales



Una vez realizado las pruebas mecánicas con las probetas se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 90
Probeta de prueba a 25% de relleno.

Figura 90

Probeta de prueba a 25% de relleno

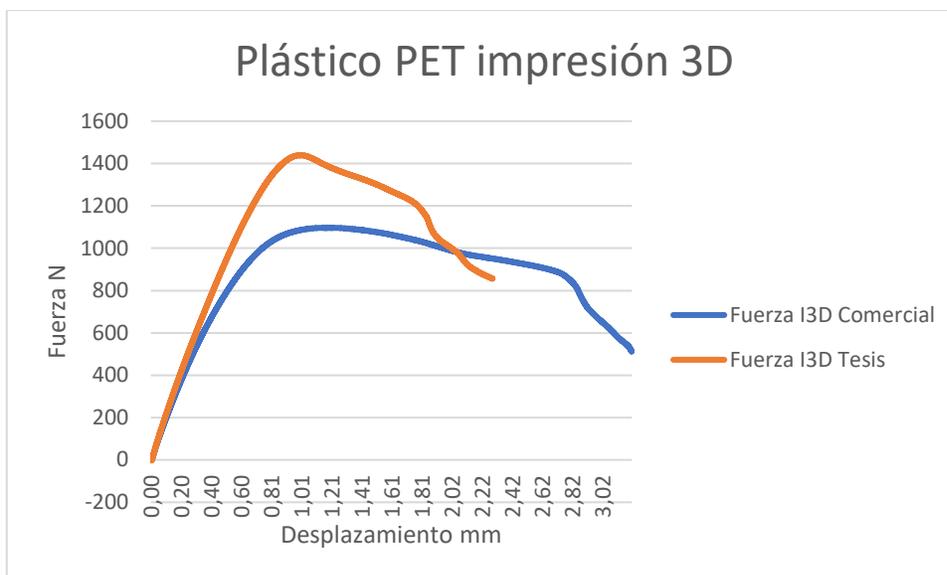


Analizando la gráfica podemos obtener los valores de las propiedades mecánicas expuestas en la Tabla 40.

Tabla 40

Parámetros mecánicos de las probetas con 25% de relleno

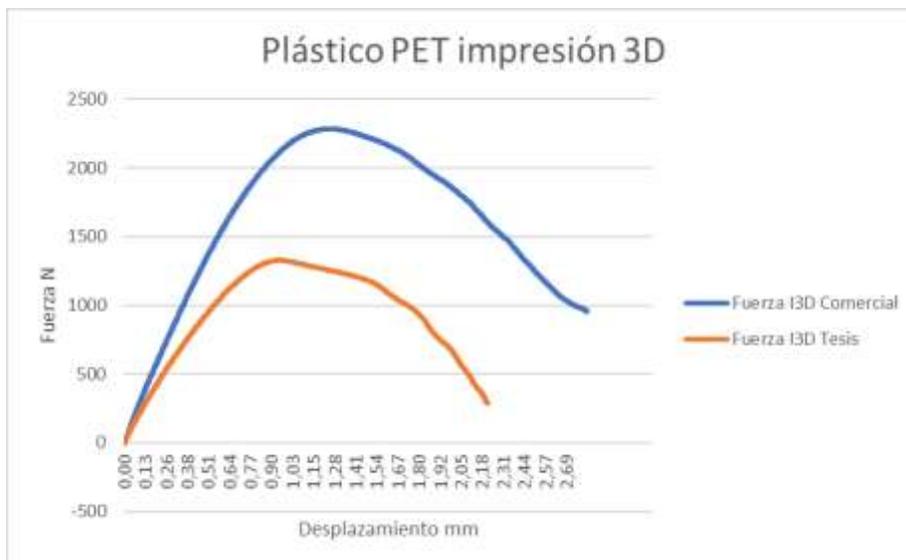
Parámetro	Impresora Tesis	Impresora Comercial
Límite elástico	10,91 MPa	6,81 Mpa
Tensión de rotura	12,6 MPa	8,79 Mpa
Módulo de Elasticidad	1,61 GPa	1,29 GPa

Figura 91*Probeta de prueba a 50% de relleno***Tabla 41***Parámetros mecánicos de las probetas con 50% de relleno*

Parámetro	Impresora Tesis	Impresora Comercial
Límite elástico	12,65 MPa	8,84 Mpa
Tensión de rotura	14,39 MPa	10,97 Mpa
Módulo de Elasticidad	1,73 GPa	1,41 GPa

Figura 92

Probeta de prueba a 75% de relleno

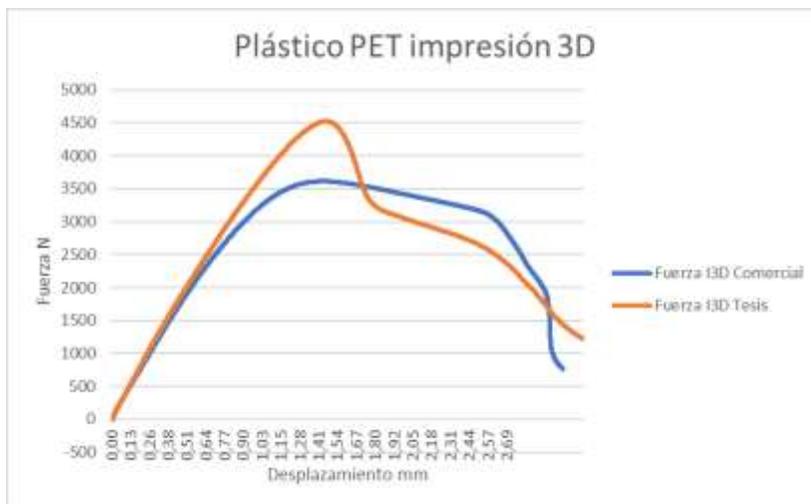
**Tabla 42**

Parámetros mecánicos de las probetas con 75% de relleno

Parámetro	Impresora Tesis	Impresora Comercial
Límite elástico	9,34 MPa	10,73 Mpa
Tensión de rotura	13,27 MPa	22,83 Mpa
Módulo de Elasticidad	1,86 GPa	2,75 GPa

Figura 93

Probeta de prueba a 100% de relleno

**Tabla 43**

Parámetros mecánicos de las probetas con 100% de relleno

Parámetro	Impresora Tesis	Impresora Comercial
Límite elástico	25,74 MPa	26.67 Mpa
Tensión de rotura	45,25 MPa	36,11 Mpa
Módulo de Elasticidad	3,8 GPa	3,46 GPa

Analizando las probetas con el 100% de relleno se determina que debido a la forma de disposición de las líneas infill las propiedades mecánicas son similares, pero en el caso de la Tensión de rotura es muy superior en las probetas impresas en la impresora 3D con el extrusor para material reciclado, debido a las condiciones en las que se construye e imprime la misma. Lo que permite concluir que se obtienen mejores propiedad en cuanto a la tensión de rotura sin importar si tratase de un relleno de 25% o una probeta totalmente sólida.

Tabla 44

Características de PET con las que se hicieron pruebas de impresión

Lugar de adquisición	Cantidad	Costo	PET
Empresa ENKADOR (Sangolquí-Ecuador)	2.5 kilos	Entrega gratuita previa solicitud	
SKP (QUITO-ECUADOR)	1 kilo en filamento que es cortado manualmente en pequeños trozos de máximo 5mm	\$24	
IMPRESORAS3D.COM (ESPAÑA)	1 kilo	€ 11	

El PET de la empresa ENKADOR es un material cuyos gránulos vienen pegados en su mayoría y superan los 5mm de longitud por lo cual si bien es cierto se derritió al hacer pruebas de impresión el hecho de que estén pegados los gránulos produjo que el extrusor se atasque por lo que no es recomendable utilizar este tipo de PET.

El uso del PET de la empresa SKP depende de la longitud en la que se corte el filamento, al cortar en pedazos de menos de 4mm o hasta 5mm se obtiene una buena impresión ya que en el extrusor el material sale sin problema y no presenta atascamientos.

El uso del PET de la empresa IMPRESORAS3D.COM también es ideal para utilizar en el extrusor ya que al ser esférico el material es relativamente más fácil el ingreso al extrusor sin embargo de nuestra experiencia haciendo pruebas nos pudimos dar cuenta que el material no ayuda para un buen acabado.

La temperatura de impresión de estos tres materiales fue de 210°C.

Alcances y Limitaciones

- La impresora 3D para plástico PET reciclado cuenta con 3 ejes de posicionamiento que le permiten imprimir objetos de una manera precisa en comparación con una impresora comercial de dimensiones similares.
- La máquina cuenta con un extrusor para gránulos de material, cuyas dimensiones no deben superar los 5mm de su diámetro exterior máximo.
- La capacidad de almacenamiento de material para imprimir es de máximo 100 gramos ya que, al estar en movimiento constante durante el proceso, tiende a arrojar ciertas partículas fuera de la zona de almacén de material.
- La impresora 3D para plástico PET reciclado funciona de acuerdo a los requerimientos del usuario cuyas limitaciones de tamaño de objetos se limita a las dimensiones del volumen de trabajo.
- Al realizar el proceso de impresión la máquina debe imprimir a un tiempo de trabajo inferior al normal, así se evitan errores en las dimensiones del producto requerido, debido principalmente a la velocidad de avance que requiere el extrusor para transportar y transformar en filamento los granulos del plástico a utilizarse.

Capítulo IV

Conclusiones

- La investigación permitió el desarrollo de un sistema de manufactura aditiva para la micro-extrusión de polímero PET reciclado.
- En la investigación se determinó las propiedades del polímero PET reciclado cuyas características físicas permitieron realizar la impresión por micro-extrusión
- Se diseño y fabricó una máquina cartesiana que permite imprimir en 3D piezas cuyo material de origen es el polímero PET reciclado, con un volumen de trabajo específico.
- Se implementó un sistema de control apropiado para el correcto funcionamiento de la impresora 3D capaz de cumplir con los requerimientos de la micro-extrusión de polímero PET reciclado.
- La ejecución del algoritmo de posicionamiento permitió obtener las coordenadas de calibración para el movimiento de los ejes XYZ de la impresora 3D.
- Al realizar las pruebas de impresión se obtuvieron probetas con un diferente relleno, cuyas medidas se aproximaban al diseño original con errores inferiores al 3,8%.
- En el análisis de las pruebas de tracción se obtuvo que las probetas que fueron impresas en la maquina construida superaba el esfuerzo de rotura en 25% al valor obtenido en las mismas pruebas realizadas a probetas en una máquina comercial.

Recomendaciones:

- Para obtener mejores resultados en el acabado de la impresión se recomienda disminuir la velocidad de impresión bajo el 60% ya que así se garantiza que el material extruido sea un de un diámetro adecuado, con el propósito de una mejor presentación de la pieza.
- Se recomienda calibrar la cama cuando se mueva la máquina de un lugar a otro ya que tiende a deslizarse por una mínima longitud entre la boquilla y la cama caliente.

- Debido a las limitaciones del alcance del extrusor se debe limitar a imprimir piezas mayores al 60% del área de la plataforma ya que por limitaciones mecánicas se debe imprimir piezas que no superen las 3 horas de impresión.

Trabajos futuros

- Una de las mejoras es el montaje de un sistema de alimentación continua en la zona de almacenamiento de material, para poder imprimir piezas de mayor tamaño considerando el volumen máximo de impresión.
- Diseñar un extrusor para materiales más duros con los que se podría incluso mezclar distintos tipos de polímeros para obtener piezas con mejores propiedades mecánicas, o adecuadas para ciertas aplicaciones.
- Desarrollar un algoritmo que permita obtener mejores resultados al incrementar la velocidad de impresión.

Bibliografía

- Aguinsaca García, D. A. (2017). Diseño y construcción de una impresora 3D tipo cartesiana para la elaboración de placas electrónicas tipo SMD. [*Tesis de grado, Universidad de Las Fuerzas Armadas-ESPE*]. Obtenido de <https://www.cenidet.edu.mx/subplan/biblio/seleccion/Tesis/MK%20Jos%E9%20%20Alejandro%20L%F3pez%20Leyva%202012.pdf>
- Arandes, J., Bilbao, J., & López Valerio, D. (2004). Reciclado de residuos plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 5(1), 28-45. Obtenido de <http://www.arpet.org/docs/Reciclado-de-residuos-plasticos-Revista-Iberoamericana-de-Polimeros.pdf>
- Arapack. (31 de Enero de 2018). *¿Qué es el PET?* Obtenido de <https://www.arapack.com/faq/que-es-el-pet/>
- Autodesk Latinoamérica. (s.f.). *Impresión 3D*. Obtenido de <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-printing>
- B2B, A. (1 de junio de 2014). *Reportero Industrial*. Obtenido de <https://www.reporteroindustrial.com/temas/Servomotores-sin-escobillas-de-diversos-tamanos,-MAC+98303>
- Baleares, F. (6 de Marzo de 2020). *Tuning 3D*. Obtenido de <http://tuning3d.com/calibracion-del-pid/>
- Budynas , R., & Nisbet, J. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México: MC GRAW HILL.

- Buter, M. (1 de Agosto de 2016). *Ultimaker*, 2.8. (Optalia, Editor) Recuperado el 12 de Septiembre de 2017, de Cajas de plástico para la electrónica:
<https://ultimaker.com/download/67619/TDS%20ABS%20v3.011-spa-ES.pdf>
- Cedal. (18 de Mayo de 2016). *Coproracion Ecuatoriana CORPESA*. Obtenido de
<http://www.cedal.com.ec/categorias/perfiles-de-aluminio/tubos/cuadrado/tubos-cuadrados.html>
- Chavaliers, P. (29 de Enero de 2015). *Tecdron Robotic System*. Obtenido de
<http://www.tecdron.fr/en/fireextinguishing-operation-sdis-17>
- Coimbra , S. (15 de 10 de 2020). *Mixtronica*. Obtenido de
<https://mixtronica.com/motores-e-correias-acessorios/29409-17hs4401-step-motor-nema-17-4-28kg.html>
- Espinosa Aguilar, J. G. (2019). Evaluación del Proceso de Termoformado para la Obtención de la Carcasa de la Alarma ChevyStar, Utilizando Ingeniería Inversa y Simulación por Elementos Finitos. [Tesis de Maestría, Universidad Internacional SEK]. Obtenido de
<https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/3309/1/DOCUMENTO%20FINAL.pdf>
- Fallerovo, M. (12 de 05 de 2021). *Makerbot*. Obtenido de Makerbot Company:
<https://www.makerbot.com/service-partners/>
- Ficalora, J. P., & Cohen, L. (2009). *Quality Function DEployment and SIX SIGMA, A QFD Handbook*. Indiana: Prentice HALL.
- GmbH, i. I. (20 de Enero de 2021). *Productos ITEM*. Obtenido de Productos ITEM:
<https://mx-product.item24.com/es/catalogar/products/perfiles-5-1001009634/>

- Gómez, J. J., & Gutiérrez, J. E. (Noviembre de 2007). Diseño de una extrusora para plástico. [*Tesis de grado, Universidad Tecnológica de Pereira*]. Obtenido de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1110/668413G633d.pdf>
- González, L. (Enero de 2018). Estudio experimental de la transición vítrea y de la dinámica macromolecular en dispersiones sólidas amorfas del antibiótico clorafenicol en ácido poliláctico. [*Tesis de grado, Universidad Politécnica de Catalunya*]. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/115107/TFG.pdf>
- Gordon Budynas, R., & Nisbett, J. K. (2015). *Diseño de ingeniería mecánica de Shigley*. Huston: McGraw-Hill.
- Higuera García, A., & Castillo García, F. J. (2013). *CIM: EL COMPUTADOR EN LA AUTOMATIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN*. España: Universidad de Castilla.
- IPAC Duferco Group. (2014). Obtenido de <http://www.ipac-acero.com/producto-detalle.php?id=9>
- Jani, M. (9 de 11 de 2021). *e3D_Online*. Obtenido de e3D-Online: <https://e3d-online.com/products/high-temperature-heated-beds>
- Klopperman, W. (10 de 12 de 2020). *RepRap*. Obtenido de RepRap World: <https://reprap.world/electronics/3d-printer-modules/autonomous-printing/smart-controller-graphical-lcd-12864-lcd/>
- Kunststoffdreherei GmbH. (2019). *Procesamiento de plásticos mediante varios métodos*. Obtenido de K&B: <https://kb-kunststoffdreherei.de/plastico/procesamiento-de-plasticos/?lang=es>

Lauge, S. (8 de 6 de 2021). *Filament2print*. Obtenido de Filament2print:

<https://filament2print.com/gb/spares-extras/926-ntc-100k-thermistor.html>

Lopez Acurio, J. A. (20 de Octubre de 2018). *Prototipado de una máquina extrusora de filamento plástico PET para una impresora 3D, a través de una herramienta de diseño y simulación (CAD)*. Obtenido de Repositorio ESPE:

<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/24541/1/M-ESPEL-emt-0087.pdf>

López Leyva, J. A. (2012). *Mejoramiento del diseño y ensamblado de una impresora 3D. [Tesis de Maestría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico]*.

Obtenido de

<https://www.cenidet.edu.mx/subplan/biblio/seleccion/Tesis/MK%20Jos%E9%20%20Alejandro%20L%F3pez%20Leyva%202012.pdf>

Makhal, A. (2015). *Comparison and Evaluation of Common Hands with Self-designed Task-Specific Robotic Hands in context of Grasp*. Pocatello, Idaho: Robotics.

Microsoft. (2017). *Microsoft*. Obtenido de <https://developer.microsoft.com/en-us/windows/kinect>

Mott, R. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. México: Pearson Education.

Obtenido de Engranajes Cilíndricos .

Mott, R. L. (2010). *Diseño de Elementos de Máquinas*. México: Pearson Education.

Navarrete Socasi, J. C., & Paucar Bastidas, P. B. (30 de Octubre de 2018).

Investigación, diseño e implementación de un prototipo de impresora 3d para la fabricación de formas tridimensionales a base de polímeros hidrofílicos.

Obtenido de Repositorio ESPE:

<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/15617>

- Ortega, D. (30 de marzo de 2020). *Dorcu*. Obtenido de Maker of Makers:
<https://dorcu.com/creality-ender-3-como-instalar-marlin-y-bootloader/>
- Ortiza Abata, C. F. (15 de Agosto de 2018). *Diseño y construcción de una maquina extrusora de filamentos de 1.75mm y 3mm de diámetro para impresoras 3D, a partir de polímero reciclado*. Obtenido de Repositorio ESPE:
<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/14935/1/T-ESPEL-MEC-0144.pdf>
- Phunopas, A. (Marzo de 2016). *Description Paper iRAP Robot*. Obtenido de TDP COLLECTION: http://www.robocup2016.org/media/symposium/Team-Description-Papers/RescueRobot/RoboCup_2016_RescueR_TDP_Irap.pdf
- Place, A. (25 de Julio de 2015). *Motion Dynamics Australia* . Obtenido de Motion Dynamics Australia : <https://www.motiondynamics.com.au/united-my6812-12v-dc-100w-2750-rpm-electric-motor.html>
- Quito Chulca, R. A., & Villafuerte Chompol, E. F. (Abril de 2011). *Planta de reciclado polietilentereflatalo. [Tesis de grado, Universidad de Guayaquil]*. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/4681/1/T176.pdf>
- Rd, R. (20 de Agosto de 2016). *PCB linear*. Obtenido de <https://www.pbclinear.com/Download/Catalog/ML-Catalog.pdf>
- Repetier. (12 de 04 de 2020). *Firmware Repetier*. Obtenido de <https://www.repetier.com/firmware/v092/>
- Rod, F. (2014). *Montaje y Puesta en Marcha de Sistemas Robóticos y sistemas de visión*. Mexico: IC Editorial.
- Rodríguez Galbarro, H. (12 de 11 de 2021). *Ingemecanica*. Obtenido de <https://ingemecanica.com/contacto/contacto.html>

Romeo Ortega, A. L. (1998). *Passivity-Based Control of Euler-Lagrange Systems*.

London: Springer.

Sánchez Restrepo, S. (17 de Junio de 2020). *Guía completa: plásticos en la impresión*

3D. Obtenido de 3Dnatives: <https://www.3dnatives.com/es/plasticos-impresion-3d-22072015/#!>

Sanz, P. (2011). *Universidad Carlos III de Madrid- Departamento de Mecánica*.

Recuperado el 29 de Febrero de 2016, de [http://e-](http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11759/PFC_Pablo_Hernando_Sanz.pdf)

[archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11759/PFC_Pablo_Hernando_Sanz.pdf](http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11759/PFC_Pablo_Hernando_Sanz.pdf)
[?sequence=1](http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11759/PFC_Pablo_Hernando_Sanz.pdf)

Sepe, M. (28 de Noviembre de 2011). *La importancia de las temperaturas de fusión y de*

molde. Obtenido de Plastics Technology México: [https://www.pt-](https://www.pt-mexico.com/columnas/la-importancia-de-las-temperaturas-de-fusin-y-del-molde)
[mexico.com/columnas/la-importancia-de-las-temperaturas-de-fusin-y-del-molde](https://www.pt-mexico.com/columnas/la-importancia-de-las-temperaturas-de-fusin-y-del-molde)

ServoDatabase Servo Specifications and Review, 1.9. (12 de Mayo de 2009).

Recuperado el 12 de Septiembre de 2017, de

<https://servodatabase.com/servo/hitec/hs-m7990th>

Silva, M. (9 de Noviembre de 2021). *Impresoras 3D*. Obtenido de Everything to create:

<https://www.impresoras3d.com/blog/>

Statista. (s.f.). *Statista.com*.

Tangtou, A. (3 de 11 de 2018). *LED CARD*. Obtenido de LED CARD: [https://www.led-](https://www.led-card.com/meanwell-lrs-350-24-300w-24v-power.html)

[card.com/meanwell-lrs-350-24-300w-24v-power.html](https://www.led-card.com/meanwell-lrs-350-24-300w-24v-power.html)

Technology, C. I. (Noviembre de 2012). *Jet Propulsión Laboratory*. Obtenido de

<https://mars.jpl.nasa.gov/msl/>

Valverde Ponce, R. (2016). Impresoras 3D: Marco teórico, modelos de desarrollo y campos de aplicación. [*Tesis de grado, Universidad de Castilla-La Mancha*].

Obtenido de

<https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Z6BgkNI->

[BYkJ:https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/10513+&cd=1&hl=es-](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Z6BgkNI-BYkJ:https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/10513+&cd=1&hl=es-)

[419&ct=clnk&gl=ec](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Z6BgkNI-419&ct=clnk&gl=ec)

Vázquez Morillas, A., Espinosa Valdemar, R. M., Beltrán, M., & Velasco Pérez, M. (2016). El reciclaje de los plásticos. *Universidad Autónoma Metropolitana*.

Obtenido de [http://biblioteca.anipac.mx/wp-](http://biblioteca.anipac.mx/wp-content/uploads/2016/10/0047_El_Reciclaje_de_los_Plasticos.pdf)

[content/uploads/2016/10/0047_El_Reciclaje_de_los_Plasticos.pdf](http://biblioteca.anipac.mx/wp-content/uploads/2016/10/0047_El_Reciclaje_de_los_Plasticos.pdf)

Vilanova , G. (10 de Junio de 2015). *Bove-Ag Plásticos y Elastómeros S. L.* Obtenido de

Bove-Ag Plásticos y Elastómeros S. L.: [http://www.plasticos-](http://www.plasticos-mecanizables.com/plasticos_coeficiente_friccion.html)

[mecanizables.com/plasticos_coeficiente_friccion.html](http://www.plasticos-mecanizables.com/plasticos_coeficiente_friccion.html)

WMH. (15 de junio de 2021). *Direct industry*. Obtenido de Direct industry:

<https://www.directindustry.es/prod/wmh-srl/product-99689-924551.html>

Wolf, A., Steinman, R., & Schunck, H. (2005). *Grippers in Motion: The Fascination of Automated Handling Tasks*. Berlín: Springer.

Anexos

