



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de
Querétaro

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE QUERÉTARO

PROCESAMIENTO DE MATERIALES MEDIANTE UN SISTEMA DE IMPRESIÓN 3D BASADO EN ALGORITMOS NO LINEALES DE MOVIMIENTO

TESIS

Que para obtener el Grado de:
MAESTRO EN INGENIERÍA

presenta

JUAN JIMÉNEZ GUILLEN

Dirigida por:

Director: Dr. Carlos Velasco Santos

Co-Director: Dr. Domingo Rangel Miranda

Noviembre 2019





"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Querétaro, Qro., 31 de Octubre del 2019
DIV. DE EST. POSG. E INV.
DEPI-241/2019

JIMENEZ GUILLEN JUAN
ESTUDIANTE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
PRESENTE

De acuerdo con el Reglamento para Exámenes Profesionales de la Dirección General de Educación Superior Tecnológica, se le autoriza la impresión de la Tesis, para obtener el Grado de MAESTRIA EN INGENIERÍA, titulada:

"PROCESAMIENTO DE MATERIALES MEDIANTE UN SISTEMA DE IMPRESIÓN 3D BASADO EN ALGORITMOS NO LINEALES DE MOVIMIENTO"

Para el correspondiente Examen de Grado.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
"la tierra será como sean los hombres"

MA. DEL CONSUELO ALCÁNTARA TÉLLEZ
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



C.C.P.. Archivo
MCAT/mrr*



Santiago de Querétaro, Qro. 20 de noviembre de 2019.

El que suscribe, egresado de la MAESTRÍA en INGENIERIA; de manera libre y voluntaria autorizo al Centro de Información del Instituto Tecnológico de Querétaro a difundir la obra de mi autoría con el Título del trabajo **PROCESAMIENTO DE MATERIALES MEDIANTE UN SISTEMA DE IMPRESIÓN 3D BASADO EN ALGORITMOS NO LINEALES DE MOVIMIENTO**. Para fines académicos, científicos y tecnológicos, mediante formato CD-ROM o digital, desde Internet, Intranet y en general cualquier formato conocido o por conocer.

Dicha obra estará disponible al estudiantado de esta Institución a partir del 25 de noviembre de 2019, fecha en la cual se puede difundir la obra.

Postulante: JUAN JIMENEZ GUILLEN

No. de Control: M17142763
m17142763@itq.edu.mx

Correo electrónico:

Título de la obra: PROCESAMIENTO DE MATERIALES MEDIANTE UN SISTEMA DE IMPRESIÓN 3D BASADO EN ALGORITMOS NO LINEALES DE MOVIMIENTO

Área del conocimiento: Ingeniería en impresión tridimensional

Palabras clave de la obra (Anisotropicas, Impresión tridimensional, Entramados, Algoritmos, PLA)

JUAN JIMENEZ GUILLEN





**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
COORDINACIÓN DE POSGRADO**

CONSTANCIA DE APROBACIÓN DE TESIS

Santiago de Querétaro, Qro. a 25 de septiembre de 2019

Ma. Del Consuelo Alcántara Téllez
Jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación
Instituto Tecnológico de Querétaro
PRESENTE.

Nos permitimos hacer de su conocimiento, que después de haber procedido a la revisión y evaluación rigurosa y detallada de la Tesis del (de la) C.

ING. JUAN JIMÉNEZ GUILLÉN

Cuyo título es:

PROCESAMIENTO DE MATERIALES MEDIANTE UN SISTEMA DE IMPRESIÓN 3D BASADO EN ALGORITMOS NO LINEALES DE MOVIMIENTO

Este jurado considera APROBADO dicha Tesis y se le notifica que el tesista puede continuar con los trámites correspondientes para obtener el Grado de Maestría.

Sin más por el momento, nos despedimos de usted.

Atentamente,

Comité Tutorial



DIRECTOR(A)
DR. CARLOS VELASCO SANTOS



CODIRECTOR(A)
DR. DOMINGO RANGEL MIRANDA



ASESOR(A)
M.C. OMAR ALEJANDRO CERVANTES GLORIA

c. c. p. Presidente comité tutorial
Expediente del alumno
alumno



Agradecimientos

A Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizaje, experiencias y felicidad.

A mis padres Juan Jiménez gallegos y Albina guillen Aguilar. Por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una buena educación en el transcurso de mi vida.

A mi comité directivo, Dr. Domingo Rangel miranda, Dr. Carlos Velasco santos, Dra. Ana Laura. Por su guía, comprensión, paciencia, entrega y valiosos consejos a lo largo del proceso de investigación.

Al técnico de pruebas mecánicas de CFATA, M en I. Gerardo Fonseca Hernández. Por su apoyo para la realización de pruebas mecánicas.

A los doctores y maestros que me brindaron sus conocimientos durante el proceso de las materias y durante el posgrado.

Indice general

Agradecimientos	2
Resumen	8
Palabras clave:.....	9
Abstract	10
Keywords:	11
Introducción	12
1. Marco teórico.....	14
1.1. Polímeros	14
1.1.1. Producción de polímeros	14
1.1.2. Clasificación de los polímeros.....	15
1.2. Ácido polilactico PLA.....	18
1.2.1. Historia PLA.....	19
1.2.2. Producción del PLA	19
1.2.3. Propiedades físicas y mecánicas del PLA.....	21
1.2.4. Características del PLA.....	22
1.2.5. Aplicaciones del PLA	23
1.2.6. Biodegradabilidad PLA.....	24
1.2.7. Biorreabsorción PLA	25
1.3. Impresión Tridimensional (3D).....	25
1.4. Servomecanismo.....	27
1.5. Manufactura aditiva	29
1.6. G code	30
1.6.1. Intrusiones G code.....	31
1.7. Pruebas mecánicas.....	32
1.7.1. Pruebas mecánicas con máquina universal	34
1.7.2. Esfuerzo deformación	35
1.7. Antecedentes	37
2. Metodología.....	41
2.1. Construcción de una impresora 3D de arquitectura cartesiana.....	41
2.2. Electrónica	47
2.3. Definición de variables	50
2.4. Metodología de control	51
2.4.1. Metodología de impresión.....	52
2.5. Interfaz de control.....	55
2.6 Imprimir materiales en diferente configuración de entramado con ácido poliláctico.	58

2.6.1. Impresión logarítmica.....	60
2.6.2. Impresión exponencial.....	60
2.7. Caracterización mecánica.....	61
3. Resultados.....	62
3.1. Algoritmo lineal.....	62
3.2. Algoritmo no lineal.....	63
3.3. Compresión horizontal.....	65
3.4. Compresión vertical.....	67
3.5. Bending.....	69
3.6. Comparación.....	70
4. Conclusiones.....	74
Referencias Bibliográficas.....	75
Anexos.....	77
Anexo 1: Programa en lenguaje grafico LabVIEW.....	77
Anexo 2: Programa microcontrolador maestro en lenguaje C CCS C compilador.....	79
Anexo 3: Programa microcontrolador esclavo eje X en lenguaje C CCS C compilador.....	82
Anexo 4: Programa microcontrolador esclavo eje Y en lenguaje C CCS C compilador.....	84
Anexo 5: Programa microcontrolador esclavo eje Z en lenguaje C CCS C compilador.....	86
Anexo 6: Programa microcontrolador esclavo eje E en lenguaje C CCS C compilador.....	89
Anexo 7: Programa microcontrolador esclavo temperatura en lenguaje C CCS C compilador.....	91
Anexo 8: Datos motor a pasos SM-42BYG011-25EN.....	93
Anexo 9: Datos motor a pasos SY42STH47-1206 ^a	94
Anexo 10: Datos motor a pasos YH42BYGH47.....	95
Anexo 11: Datos microcontrolador PIC18F4550.....	96

Indice de figuras

Figura 1. Cadena lineal. (Hermida, 2011).....	16
Figura 2. Cadena ramificada. (Hermida, 2011).....	16
Figura 3. Cadena entrecruzada. (Hermida, 2011).....	16
Figura 4. Cadena Homopolímero. (Hermida, 2011).....	17
Figura 5. Unidad estructural PLA. (Serna et al. 2003).....	18
Figura 6. Diferentes rutas en la manufactura de bases poliméricas de ácido láctico. (Serna et al. 2003).....	20

Figura 7. Síntesis de ácido polilactico. (Serna et al. 2003)	20
Figura 8. Esquema de funcionamiento de la impresión 3D (Olguin, 2016).	27
Figura 9. Esquema de un servomecanismo accionado por husillo de bolas (Min & Sung. 2006).	28
Figura 10. Representación esquemática de algunos ensayos a carga estática, (a) compresión, (b) tensión o tracción, flexión en (c) 3 y (d) 4 puntos (Kuhn & Medlin, 2000). ...	33
Figura 11. Aditamentos de una maquina universal utilizados para las pruebas de (a) tensión, (b) compresión, flexión de (c) 3 y (d) 4 puntos (Kuhn & Medlin, 2000).	34
Figura 12. Esquema de la estructura mecánica básica de una maquina universal electromecánica (Kuhn & Medlin, 2000).....	35
Figura 13. Diagrama esfuerzo (σ) - deformación (ϵ) unitarios (Gere and Goodno, 2009).	36
Figura 14. Mecanismo eje X.	42
Figura 15. Mecanismo eje Y.	43
Figura 16. Mecanismo eje Z.....	44
Figura 17. Extrusor de polea eje E.....	45
Figura 18. Área de impresión.....	46
Figura 19. Red electrónica de control	48
Figura 20. Máquina de estados del proceso.	51
Figura 21. Entramado lineal o convencional	52
Figura 22. Configuración de entramado no lineal ejemplo logarítmico	53
Figura 23. Función tipo exponencial	54
Figura 24. Función tipo logarítmica	54
Figura 25. Interfaz de control para impresión 3D.	55
Figura 26. Bloque Selección y conexión del dispositivo.	56
Figura 27. Selección de impresión.....	56
Figura 28. Control de posición.	57
Figura 29. Controles de ajuste del dispositivo.....	57
Figura 30. Indicador de posición.....	58
Figura 31. Probeta rectangular.	59
Figura 32. Probeta con configuración normal.....	59
Figura 33. Probeta función logaritmo.....	60
Figura 34. Probeta función exponente.....	61
Figura 35. Patrones de relleno lineal o convencional con variación de densidad mediante algoritmo lineal propuesto.....	62

Figura 36. Patrones de relleno lineal o convencional con variación de densidad mediante software de impresión 3D Repetier Host®.	63
Figura 37. Control de las funciones exponencial, logarítmica y senoidal a aplicar en el algoritmo no lineal de impresión 3D.	63
Figura 38. Patrones de relleno Exponencial, Logarítmico y Senoidal mediante algoritmo no lineal propuesto.	64
Figura 39. Curvas esfuerzo vs deformación obtenidas mediante pruebas de compresión en eje horizontal en probetas con diferentes entramados de acuerdo al algoritmo utilizado en impresión 3D.	65
Figura 40. Curvas esfuerzo vs deformación obtenidas mediante pruebas de compresión en eje horizontal, aplicando un ajuste exponencial en probetas exponencial.	66
Figura 41. Curvas esfuerzo vs deformación obtenidas mediante pruebas de compresión en eje horizontal, aplicando un ajuste exponencial en probetas tipo logaritmo.	67
Figura 42. Curvas esfuerzo vs deformación obtenidas mediante pruebas de compresión en eje vertical en probetas con diferentes entramados de acuerdo al algoritmo utilizado en impresión 3D.	68
Figura 43. Curvas esfuerzo vs deformación obtenidas mediante pruebas Bending con diferentes entramados de acuerdo al algoritmo utilizado en impresión 3D.	69
Figura 44. Curvas esfuerzo deformación de diferentes compuestos de PLA (Liu et al. 2019).	71
Figura 45. Curvas esfuerzo deformación de estructuras tipo panal tipo hexagonal (San et al. 2019).	72

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades del PLA. (Serna et al. 2003)	21
Tabla 2. Propiedades de polímeros usados como material de empaque. (Serna et al. 2003).....	22
Tabla 3. Características materiales.....	47
Tabla 4. Características microcontrolador PIC 18F4550	49
Tabla 5. Características motores a pasos	50
Tabla 6. Respuesta mecánica del PLA y compuestos a base de PLA.	73

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Esfuerzo deformación.....	36
Ecuación 2. Función logarítmica.	60
Ecuación 3. Función exponencial.....	61

Resumen

Al fabricar estructuras complejas con variaciones anisotrópicas de manera artificial es posible desarrollar la ingeniería de tejidos para la fabricación de algunas estructuras biológicas con funciones muy específicas. Actualmente se cuentan con herramientas que pueden construir algunas de estas estructuras. En este trabajo se aplicó la impresión tridimensional (3D) no convencional para el desarrollo de este tipo de estructuras complejas, ya que las impresoras 3D tradicionales tienen ciertas limitantes en cuanto al entramado fibroso ya que solo se puede imprimir linealmente, es decir, con una densidad fibrosa muy regular, lo que no permite tener variaciones complejas en la forma del entramado, densidad o porosidad por este método de manufactura aditiva clásica. Por este motivo fue necesario desarrollar un nuevo dispositivo de impresión 3D que contara con la capacidad de construir los entramados de relleno con funciones matemáticas específicas para fabricar estructuras anisotrópicas. Este sistema trabaja con algoritmos no lineales de movimiento, el cual fue diseñado y construido a partir de un sistema de impresión de 3 ejes convencional, donde se programó un sistema de impresión de materiales de precisión basado en un esquema de microcontroladores sincronizados en forma de maestro-esclavo, en este sistema es posible aplicar funciones no lineales de impresión y mediante una interfaz gráfica de usuario desarrollada en una PC en LabVIEW® se logró controlar los parámetros de impresión obteniendo materiales con anisotropía intrínseca programada. Se reportan resultados de la fabricación de entramados impresos de PLA (ácido poliláctico) en base a funciones no lineales tales como tipo logarítmica y tipo exponencial. Dicha implementación de los algoritmos no lineales dio como resultado varios tipos de materiales con estructuras anisotrópicas, es decir, probetas con un entramado convencional densificadas en un 100%, así como probetas con un entramado con variación longitudinal tipo logarítmico y probetas con un entramado longitudinal exponencial. Una vez obtenidas probetas estandarizadas de estos materiales le fueron aplicadas pruebas mecánicas de flexión y compresión en las que se pudo observar un módulo elástico variante (no lineal) al aplicar la fuerza sobre las probetas, cuya fuerza máxima de soporte fue de 30 MPa para las probetas tipo logarítmico en compresión. Así mismo se caracterizaron las probetas de entramado regular o lineal, las cuales tuvieron un módulo elástico lineal propio del PLA de 70.22 MPa, en cambio las de entramado tipo exponencial tuvieron un módulo de elasticidad cambiante en el tiempo de

forma exponencial desde 0 a 16 MPa. Con este tipo de manufactura no lineal es posible fabricar estructuras biopoliméricas con anisotropía estructural intrínseca.

Palabras clave:

Anisotropicas

Impresión tridimensional

Entramados

Abstract

By printing three-dimensional (3D) complex structures with anisotropic variations it is possible to develop tissue engineering for manufacturing some biological structures with very specific functions. Currently, there are not manufacturing processes that can build some of these non linear structures. In this work, unconventional 3D printing was applied for the development of this type of complex structures, since traditional 3D printers have limitations respect of fibrous structure printing. It only use linear printing, that is, with a very regular fibrous density, which does not allow complex variations in the shape of the fibrous structure, density or porosity as a classical additive manufacturing method. For this reason it was necessary to develop a new 3D printing process that improves the ability to build filler frames with specific mathematical functions. This system works with non-linear movement algorithms, which was designed and built from a conventional 3-axis printing system, where a precision material printing system based on a master-slave synchronized microcontroller scheme is programmed. In this new system it is possible to apply non-linear printing functions and through a graphical user interface developed on a PC in LabVIEW® to control the printing parameters, obtaining materials with programmed intrinsic anisotropy. Results of the manufacturing of printed structures of PLA (polylactic acid) based on nonlinear functions such as logarithmic type and exponential type are reported. The implementation of non-linear algorithms resulted in several types of materials with anisotropic structures, that is, specimens with a conventional framework densified by 100%, as well as specimens with a framework with logarithmic longitudinal variation and specimens with an exponential longitudinal framework. Once the standardized specimens of these materials were obtained, mechanical tests of flexion and compression were applied and a variant elastic modulus (non-linear) could be detected. The maximum support force was 30 MPa for logarithmic compression specimens. Likewise, the regular or linear framework specimens were characterized, which had a linear elastic modulus typical of the PLA of 70.22 MPa, instead those of the exponential type framework had an changing over time modulus from 0 to 16 MPa. With this type of non-linear manufacturing it was possible to manufacture biopolymeric structures with intrinsic structural anisotropy.

Keywords:

Anisotropic

Three-dimensional printing

structure

Introducción

La impresora 3D es un dispositivo capaz de generar un objeto sólido tridimensional mediante la adición de material, ya que se basan en modelos 3D generados por computadora, para definir qué se va a imprimir. Actualmente existen tres métodos de impresión 3d: por compactación, por adición y por estereolitografía (Song et al. 2017). En el método de adición la impresora realiza la extrusión en caliente de un filamento con un diámetro inicial a través de una boquilla circular. El filamento extruido se deposita sobre una plataforma metálica o de vidrio calentada por un cabezal de impresión en movimiento en un patrón definido por el usuario para conseguir la forma deseada. Una vez que se ha completado una cierta capa, se levanta el cabezal de impresión y se procede a depositar la siguiente capa. El usuario puede controlar el espesor de capa y la velocidad de deposición, así como la temperatura de extrusión y la velocidad de alimentación del filamento.

Normalmente, las piezas impresas en 3D están diseñadas con rellenos predeterminados y no personalizables. Además, estos patrones siguen lógicas de embalaje espacial o algoritmos que ignoran las propiedades del material, los controladores de rendimiento, o cualquier otra optimización relacionada con el material (Ying et al. 2017).

El siguiente trabajo de tesis tiene como principal objetivo desarrollar estructuras complejas mediante la utilización de biomateriales y mediante la generación de algoritmos de impresión no lineal implementados en un sistema de impresión cartesiano 3D que trabaja con mecanismos de alta precisión. Estas estructuras complejas son desarrolladas y caracterizadas mecánicamente y morfológicamente con diferente configuración de entramado en ácido poliláctico (PLA), y se llevan a cabo mediante la construcción de una impresora 3D de arquitectura cartesiana y mediante la implementación de una interfaz hombre maquina (HMI) la cual es diseñada y programada mediante algoritmos de control diseñados para movimientos lineales y no lineales que permitan imprimir entramados no convencionales.

La importancia de este tema radica en que actualmente los sistemas de impresión 3D comerciales están diseñados para desarrollar piezas con rellenos predeterminados y no personalizables, además de que esos patrones siguen lógica de embalaje espacial o algoritmos que ignoran las propiedades del material, los controladores de rendimiento, o cualquier otra optimización relacionada con el material que son necesarios en este tipo de impresión de biomateriales. El poder implementar movimientos lineales en impresión 3d nos

da ciertas ventajas ya que debido a que los sistemas de impresión 3d son un método de manufacturación aditiva que tiene la capacidad de generar objetos solidos tridimensionalmente mediante adición de material a partir de un modelo digital que define se va a imprimir, además de brinda ventajas como son: el ahorro en los procesos industriales y ensamblajes, tiene grandes aplicaciones en (medicina, salud, cultura, educación, construcción, alimentos), manufactura en diversos materiales que van desde el requerimiento de tejidos humanos hasta los minerales más diversos con los que se fabricarán microprocesadores y maquinaria pesada. El utilizar el ácido poliláctico en nuestro sistema de impresión 3d no lineal nos brinda ventajas ya que este polímero es derivado de recursos renovables, es biodegradable, reciclable, permanente e inodoro, brinda Bio-compatibilidad que es el aspecto más atractivo del PLA, especialmente con respecto a las aplicaciones biomédicas donde podría contribuir mediante prótesis que presentan estructuras muy complejas.

En el capítulo 1 se abordan las cuestiones teóricas que sustentan el planteamiento. Se hace un breve repaso del método de impresión 3D, materiales y mecanismos necesarios en la impresión 3D.

En el capítulo 2 se plantea la metodología llevada a cabo para el desarrollo del dispositivo de impresión, el diseño y creación de una interfaz hombre maquina (HMI), diseño y desarrollo de algoritmos de control, metodología de impresión 3D y planteamiento de caracterización mecánica.

En el capítulo 3 se analizan los resultados proporcionados por la caracterización mecánica y la respuesta obtenida por el dispositivo de impresión 3D.

1. Marco teórico

1.1. Polímeros

Los polímeros son moléculas de gran tamaño, constituidas por “eslabones” orgánicos denominados monómeros, unidos mediante enlaces covalentes. Los eslabones están formados, fundamentalmente, por átomos de carbono y pueden poseer grupos laterales o radicales con uno o más átomos. Estas moléculas orgánicas son las que constituyen los materiales plásticos que conocemos y también los tejidos de los seres vivos como son: piel, músculos, tela de araña, seda, etc. (FRED W. BILLMEYER, 1984)

1.1.1. Producción de polímeros

Los polímeros sintéticos se producen mediante un proceso denominado polimerización, en el cual se produce la reacción de miles de monómeros que pasan a formar parte de una larga cadena macromolecular. Del proceso de polimerización existen dos tipos: (FRED W. BILLMEYER, 1984)

- La polimerización por adición o de crecimiento de cadena, la cual se caracteriza por que los intermediarios del proceso (radicales libres, iones o complejos metálicos) son transitorios y no pueden aislarse.
- La polimerización por condensación o de crecimiento por pasos, la cual se produce por las reacciones entre moléculas que tienen grupos funcionales. A los compuestos intermediarios con peso molecular bajo se les llama oligómeros, y se pueden aislar. Por lo que a este proceso se le puede describir como una reacción química sencilla que se efectúa repetidamente.

En los polímeros el grado de polimerización de la cadena es el equivalente al número de sub-unidades o monómeros empleados para formar dicha cadena.

En la producción de polímeros a escala industrial se emplean materias primas básicas las cuales son: gas natural, carbón, y petróleo. El proceso químico de la polimerización es

complejo y diverso; ya que en el control de este proceso el ingeniero químico es quien se destaca. Los métodos de polimerización más importantes son los siguientes: (Hermida, 2011)

- **Polimerización en bloque o fase condensada:** El monómero y un iniciador se combinan en un reactor, y se calientan o enfrían según se requiera. Se debe controlar estrictamente la temperatura. Este proceso es de amplia utilización en polimerización por condensación cuando un monómero se ha cargado en el reactor y el otro se va adicionando de a poco. El proceso puede emplearse globalmente para muchas condensaciones de polímeros por su baja temperatura de reacción.
- **Polimerización en solución:** El monómero se disuelve en un solvente no reactivo que contiene un catalizador. El calor desprendido por la reacción es absorbido por el solvente y entonces la velocidad de reacción se reduce. Es difícil eliminar todo el solvente.
- **Polimerización en suspensión:** El monómero y el catalizador se suspenden en forma de gotas en una fase continua como el agua. El calor producido por la reacción es absorbido por el agua y se requiere agitación continua. Después del proceso el producto polimerizado se separa y deshidrata. Este método se emplea de modo generalizado para producir varios polímeros vinílicos.
- **Polimerización por emulsión:** Es un proceso similar al de suspensión puesto que se lleva a cabo en agua. En este caso el monómero es absorbido dentro de unas micelas creadas por un agente emulsificante, como el jabón, y dentro se produce la polimerización.

1.1.2. Clasificación de los polímeros

Hay diversas maneras de clasificar a los polímeros, se pueden subdividir según su origen, o considerando la estructura de las macromoléculas, o también según su uso, como se muestra a continuación. Clasificación por su origen:

- **Naturales:** Son sustancias producidas por organismos vivos que se emplean sin modificación. Ejemplos de estos polímeros son: proteínas como las empleadas por las arañas para tejer su tela, polisacáridos y caucho natural.
- **Sintéticos:** Son macromoléculas creadas por el hombre y se dividen en dos categorías según su comportamiento al ser calentados: Termoplásticos, al calentarse se ablandan o funden y son solubles en disolventes, están formados por moléculas de cadenas largas, a menudo sin ramificaciones. Termorrígidos, se descomponen al ser calentados y no pueden fundirse ni solubilizarse. Tienen estructuras elaboradas tridimensionales con reticulación.

Clasificación según la estructura de la cadena:

- **Lineal:** Se repite siempre el mismo tipo de unión, como se esquematiza en la Figura 1.



Figura 1. Cadena lineal. (Hermida, 2011)

- **Ramificado:** Con cadenas laterales unidas a la principal, como se esquematiza en la Figura 2.

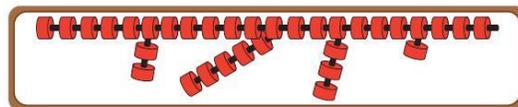


Figura 2. Cadena ramificada. (Hermida, 2011)

- **Entrecruzado:** Si se forman enlaces entre cadenas vecinas, como se esquematiza en la Figura 3.

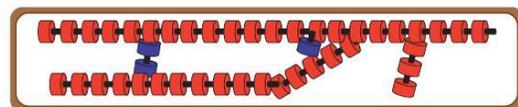


Figura 3. Cadena entrecruzada. (Hermida, 2011)

- **Homopolímero:** Los homopolímeros son aquellos polímeros en los que todos los monómeros que los constituyen son iguales. Los copolímeros están formados por dos o más monómeros diferentes, como se esquematiza en la Figura 4.

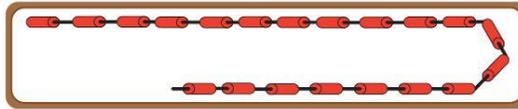


Figura 4. Cadena Homopolímero. (Hermida, 2011)

Clasificación según su respuesta termo-mecánica:

- **Termoplásticos:** Se comportan de manera plástica a elevadas temperaturas, y aun así la naturaleza de sus enlaces no se modifica radicalmente cuando la temperatura se eleva, por lo cual pueden ser conformados a temperaturas elevadas, enfriados y después recalentados o reconvertidos sin afectar el comportamiento del polímero.
- **Termorrígidos:** Los polímeros termorrígidos denominados termoestables son polímeros reticulados durante la reacción de polimerización o mediante la introducción de entrecruzamientos químicos (cross links). Este reticulado no permite que estos polímeros sean reprocesados después de que han sido conformados.
- **Elastómeros:** Los elastómeros denominados cauchos o hules tienen un comportamiento térmico que puede variar de termoplástico a termorrígido según sea su estructura lineal o reticulada. Se trata de materiales poliméricos que tienen la capacidad de deformarse mucho más que el 300% en forma elástica, cuando se remueve la fuerza aplicada para estirarlos recuperan sus dimensiones originales.
- **Adhesivos:** Tienen cierto grado de extensibilidad, alta adhesión, pero conservando cierto grado de cohesión. Suelen tener baja cristalinidad.
- **Recubrimientos de superficies:** Sus características son similares a las de los adhesivos, pero además tienen gran resistencia a la abrasión. Se usan para proteger y decorar.

- **Fibras:** Pueden tejerse o enlazarse para formar prendas dimensionalmente estables; es necesario que no cedan demasiado. Deben ser resistentes y con tendencia a la cristalización

1.2. Ácido poliláctico PLA

El ácido poliláctico, PLA, es un poliéster termoplástico que forma parte de los α -hidroxiácidos; su precursor es el ácido láctico, molécula quiral. El lactido, monómero del ácido poliláctico, es una molécula que existe bajo 4 formas: L, D, meso y racémica.

El ácido láctico (ácido 2-hidroxipropanoico, $\text{CH}_3\text{-CHOH-COOH}$) como se muestra en la Figura 5, contiene un átomo de carbono asimétrico y es el hidroxiácido más sencillo que existe. Hay dos isómeros ópticos, el D (-) láctico y L (+) láctico y una modificación racémica constituida por fracciones equimolares de las formas L (+) y D (-). A diferencia del isómero D (-), la configuración L (+) es metabolizada por el organismo humano.

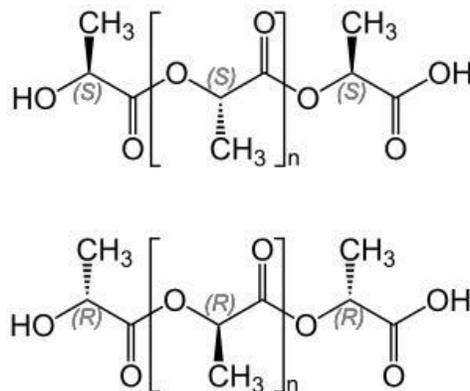


Figura 5. Unidad estructural PLA. (Serna et al. 2003)

1.2.1. Historia PLA

El ácido láctico (ácido 2-hidroxiopropanoico) fue descubierto por el químico sueco Scheelle en 1780, pero su comercialización no tuvo lugar que hasta 1881 por Charles E. Avery en Massachusetts.

El PLA ha sido objeto de muchas investigaciones desde hace algo más de un siglo. En 1845, Pelouze condensó ácido láctico por medio de una destilación con agua para formar PLA de poco peso molecular y un dímero cíclico del ácido láctico llamado lactido. Cincuenta años más tarde, en 1894, Bischoff y Walden intentaron sin éxito la producción de PLA a partir de la lactida. En 1932, Wallace Carothers, científico en Dupont, produjo un producto de poco peso molecular calentando el ácido láctico y sometiéndolo al vacío. En 1954, después de otros refinamientos, Dupont patentó el proceso de Carothers. Debido a los altos costes, este descubrimiento fue utilizado principalmente para la fabricación de suturas médicas, de implantes y como medio para dosificar medicamentos.

Más adelante, Watson (1948) publicó posibles aplicaciones del PLA para revestimientos y como constituyente en las resinas. Así mismo, en 1986, Lipinsky y Sinclair publicaron también sus hallazgos.

El coste de producción del monómero ha sido un impedimento al desarrollo extenso del polímero. Recientemente avances en la fermentación de la glucosa, han reducido el coste de producir ácido láctico, permitiendo un interés creciente en el polímero.

1.2.2. Producción del PLA

El ácido láctico utilizado en la polimerización para la producción de PLA debe ser de alta pureza. Los polímeros basados en ácido láctico, pueden manufacturarse en diferentes rutas de polimerización, las cuales se esquematizan en la Figura 6.

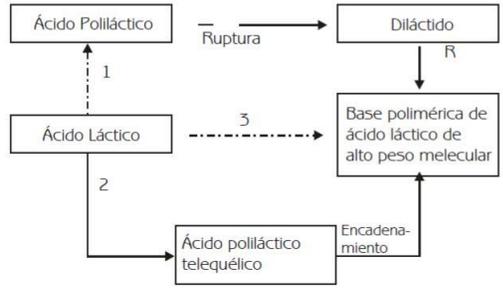


Figura 6. Diferentes rutas en la manufactura de bases poliméricas de ácido láctico. (Serna et al. 2003)

La primera ruta indicada en la Figura 6, incluye una policondensación del ácido láctico, seguido por una depolimerización hacia el dímero diláctido, el cual puede polimerizarse abriendo el anillo, en polímeros de alto peso molecular. La síntesis del ácido láctico por esta ruta puede detallarse en la Figura 7.

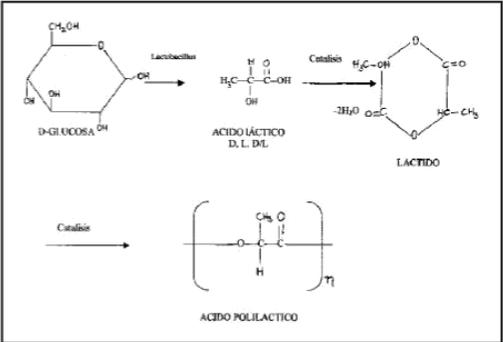


Figura 7. Síntesis de ácido poliláctico. (Serna et al. 2003)

En la segunda ruta indicada en la Figura 6, el ácido láctico es policondensado en presencia de un monómero disfuncional, por ejemplo, diol o diácido, produciendo un polímero telequético, el cual puede unirse a otro para producir polímeros de alto peso molecular.

En la tercera ruta indicada en la Figura 6, el ácido láctico es policondensado directamente en polímeros de alto peso molecular, manipulando el equilibrio entre: ácido láctico, agua y ácido poliláctico en un solvente orgánico. Estas reacciones se producen por simple calentamiento o por la acción de catalizadores como alcoóxidos metálicos y complejos quirales de aluminio.

1.2.3. Propiedades físicas y mecánicas del PLA

Las propiedades físicas y mecánicas, farmacéuticas y de reabsorción dependen de la composición del polímero, de su peso molecular y de su cristalinidad. La cristalinidad puede ajustarse desde un valor de 0% a 40% en forma de homopolímeros lineales o ramificados, y como copolímeros al azar o de bloque. Una forma cristalina (en su mayor parte compuesta de forma L lactido) y de alto peso molecular (> 100.000 Daltons) garantiza una reabsorción larga (aproximadamente de 1a 2 años). Formulaciones diferentes y la adición de radicales en las cadenas, permiten controlar o modelar la velocidad de reabsorción. La Tabla 1 muestra algunas propiedades del PLA de acuerdo a su composición.

Tabla 1. Propiedades del PLA. (Serna et al. 2003)

Masa Molecular (kda)	% Cristalinidad	Viscosidad h (dl/g)	Densidad r (g/cm³)
L-P.L.A. 50 a 756	15 a 74	0,61 a 8,2	1,25
D.L. P.L.A. 21 a 550	0 (amorfo)	0,25 a 2,01	1,29
P.L.A.-P.G.A. 20 a 145	46 a 52	0,5 a 1,6	1,50 a 1,64

Utilizando 100% de L-PLA, da como resultado un material con alto punto de fusión y alta cristalinidad. Si se usa una mezcla D y L, se obtiene un polímero amorfo con una temperatura de transición vítrea (Tg) de 60°C. Con 90% D y 10% L, se obtiene un material copolimérico, el cual puede polimerizarse en forma orientada, con temperaturas por encima de su temperatura de transición vítrea.

La temperatura de procesamiento se encuentra entre 60 y 125°C y depende de la proporción de D o L ácido láctico en el polímero. Sin embargo, el PLA puede ser plastificado con su monómero o alternativamente con ácido láctico oligomérico y esto permite disminuir Tg.

El PLA tiene propiedades mecánicas en el mismo rango de los polímeros petroquímicos, a excepción de una baja elongación. Sin embargo, esta propiedad puede ser afinada durante

la polimerización o por modificaciones post polimerización. La Tabla 2 muestra una comparación

de algunas propiedades mecánicas de plásticos de origen petroquímico contra las propiedades del PLA.

Tabla 2. Propiedades de polímeros usados como material de empaque. (Serna et al. 2003)

Polímero	Fuerza de Tensión (MPa)	Módulo de Tensión (Gpa)	Temperatura Máx. Usada (°C)
LDPE	6.2 - 17.2	0.14 – 0.19	65
HDPE	20 – 37.2		121
PET	68.9	2.8 – 4.1	204
PS	41.3 – 51.7	3.1	78
PA	62 – 82.7	1.2 – 2.8	-
PP	33 – 37.9	1.1 – 1.5	121
PLA (L+)	40 - 60	3 - 4	50 – 60

El PLA puede ser tan duro como el acrílico o tan blando como el polietileno, rígido como el Poliestireno o flexible como un elastómero. Puede además ser formulado para dar una variedad de resistencias. Las resinas de PLA pueden ser sometidas a esterilización con rayos gama y es estable cuando se expone a los rayos ultravioleta. A el PLA se le atribuyen también propiedades de interés como la suavidad, resistencia al rayado y al desgaste.

1.2.4. Características del PLA

En comparación con otros biopolímeros, la producción de PLA tiene numerosas ventajas (Yuval et al. 2016), que incluyen:

- **Ecológico:** además de ser derivado de recursos renovables (por ejemplo, maíz, trigo o arroz), el PLA es biodegradable, reciclable, permanente e inodoro.

- **Bio-compatibilidad:** el aspecto más atractivo del PLA, especialmente con respecto a las aplicaciones biomédicas.
- **Ahorro de energía:** el PLA requiere un 25-55% menos de energía para producir que los polímeros a base de petróleo.
- Es claro y brillante como el poli estireno (se utiliza para fabricar baterías y juguetes). Resistente a la humedad y a la grasa. Tiene características de barrera del sabor y del olor similares al plástico de polietileno tereftalato, usado para las bebidas no alcohólicas y para otros productos no alimenticios.
- La fuerza extensible y el módulo de elasticidad: es también comparable al polietileno. Pero es más hidrofílico que el polietileno, tiene una densidad más baja. Es estable a la luz U.V., dando como resultado telas que no se decoloran. Su inflamabilidad es demasiado baja.
- El PLA se puede formular para ser rígido o flexible y puede ser polimerizado con otros materiales. El PLA se puede hacer con diversas características mecánicas dependiendo del proceso de fabricación.

El PLA tiene un potencial probado para reemplazar los polímeros basados en petroquímicos convencionales para aplicaciones industriales o como un biomaterial líder para numerosas aplicaciones en medicina.

1.2.5. Aplicaciones del PLA

En la industria de alimentos: El PLA es una sustancia GRAS y puede ser utilizada como material de empaque para alimentos. Materiales constituidos de 10% de PLA más 90% de copoliéster, 10% de PLA más 90% de copoliámidas, 10% de PLA más 90% de almidón, 10% de PLA más 90% de policaprolactona (PLC), han sido utilizados como material de empaque

de yogurt, mantequilla, margarina y quesos de untar. Estos empaques, han cumplido funciones de protección mecánica, barrera a la humedad, a la luz, a las grasas y a los gases.

Aplicaciones médicas: En el campo de la cirugía el L-PLA tiene grandes aplicaciones como son: Material de sutura reabsorbible, material de cirugía ortopédica (implantes reabsorbibles), tornillos, broches, placas, grapas, cirugía reconstructiva craneofacial maxilofacial (tejidos óseos y tejidos blandos).

Además, el PLA es utilizado para la construcción de matrices para regeneración guiada de tejidos como piel, cartílagos, huesos, estructuras cardiovasculares, intestino, tejido urinario entre otros, es utilizado para microencapsular y nanoencapsular medicamentos de liberación lenta como insulina, cisplatino, taxol, somatostatina, antiinflamatorios.

Industria textil: El PLA estando en presentación de tipo fibra. Presentan características muy atractivas para muchos usos tradicionales, ya que los polímeros de ácido poliláctico son más hidrofílico que el PET, tienen una densidad más baja, alta resistencia al moldeo y doblado, su manipulación es fácil de controlar, tienden a ser estables a la luz ultravioleta dando como resultado telas con poca decoloración, es un material ignífugo y de baja generación de humos. Por lo que sus aplicaciones más destacadas son: las prendas de vestir, la tapicería de ciertos muebles, los pañales, los productos femeninos de la higiene, las telas resistentes a la radiación UV para el uso exterior (toldos y cubiertas).

1.2.6. Biodegradabilidad PLA

La degradación del PLA es más lenta si se tiene cristalinidad elevada o si el contenido de L-PLA es fuerte y si el peso molecular es elevado. Ante la presencia de PLA, los microorganismos (hongos y bacterias) colonizan la superficie del polímero y son capaces de segregar enzimas que rompen en pequeños fragmentos el polímero por lo que la colonización de la superficie depende de factores tales como la tensión superficial, porosidad, textura superficial y accesibilidad a las cadenas de polímeros. Los grupos hidrófilos de las enzimas (-COOH, -OH, -NH) atacan los grupos éster de las 2 cadenas de polímeros mediante reacciones de hidrólisis seguida por reacciones de oxidación, de esta

forma reducen el polímero a fragmentos de peso molecular inferiores a 500g/mol, los cuales pueden ser digeridos por los microorganismos.

1.2.7. Biorreabsorción PLA

En los tejidos vivos, el PLA. se despolimeriza totalmente por hidrólisis química, y la degradación del polímero comienza por una pérdida de peso molecular (sin pérdida de masa) y se termina por una pérdida de masa, con descomposición del polímero en monómeros y fagocitosis por los macrófagos. El hecho de que no haya un proceso enzimático, realizado por la reabsorción del polímero acarrea una débil reacción de los tejidos, que se limita a una reacción a cuerpo extraño. Después de solubilización, el ácido láctico se degrada por vía de los lactatos y piruvatos, y seguidamente es eliminado en forma de CO.

1.3. Impresión Tridimensional (3D)

Una impresora 3D es un dispositivo capaz de reproducir un objeto sólido tridimensional mediante la adición de material, cuyo diseño se realiza en computadora. El proceso consiste en añadir material capa por capa, desde abajo hacia arriba. Generalmente se utilizan polímeros, pero se está experimentando también con otros materiales como el metal (Ortiz et al. 2016).

En la actualidad los procesos de fabricación más comunes utilizados por los dispositivos de impresión 3D son:

- **Modelado por deposición fundida (FDM):** Consiste en depositar polímero fundido sobre una base plana, capa a capa. El material, que inicialmente se encuentra en estado sólido almacenado en rollos, se funde y es expulsado por una boquilla en minúsculos hilos que se van solidificando conforme van tomando la forma de cada capa.

- **Sinterizado selectivo por láser (SLS):** Consiste en la colocación de una fina capa de material en polvo en un recipiente a una temperatura ligeramente inferior a la de fusión del material. Un láser sinteriza las áreas seleccionadas causando que las partículas se fusionen y solidifiquen. Se van añadiendo y sintetizando sucesivas capas de material hasta obtener el prototipo deseado. El polvo no solidificado actúa de material de soporte y puede ser reciclado para posteriores trabajos.
- **Estereolitografía (SLA):** Consiste en la aplicación de un haz de luz ultravioleta a una resina líquida (contenida en un cubo) sensible a la luz. La luz ultravioleta va solidificando la resina capa por capa. La base que soporta la estructura se desplaza hacia abajo para que la luz vuelva a ejercer su acción sobre el nuevo baño, así hasta que el objeto alcance la forma deseada.
- **Sistemas de fabricación por compactación:** son impresoras 3D de tinta las cuales utilizan una tinta aglomerante para compactar el polvo e impresoras 3D láser, el cual transfiere energía al polvo haciendo que se polimerice. Después se sumerge en un líquido que hace que las zonas polimerizadas se solidifiquen.

Dependiendo del uso que se le dé al dispositivo, se pueden encontrar impresoras que son de uso aficionado y otras industriales, con más accesorios. Las de aficionados se utilizan con fines principalmente educativo, didáctico, no están preparadas para trabajar a diario 24 horas como las industriales.

Lo que diferencia a las impresoras 3D de otros sistemas mecanizados como los tornos a control numérico computarizado (CNC) es el concepto. “Los equipos mecanizados le dan forma a un material en bruto, lo esculpen, lo tallan a partir de las medidas y detalles previos establecidos. La impresora 3D crea el objeto de la nada.

Con impresoras 3D los tiempos para la realización de prototipos se reducen al mínimo. Solo hay que concentrarse en el diseño del objeto y pasarlo a un lenguaje que entienda la máquina como se muestra en la Figura 8. Se ahorra en herramientas, tiempo, procedimientos y en conocimientos de mecanizado.

El uso de la impresora 3D es muy sencillo, no necesita de mucha instrucción. En cambio, los tornos CNC requieren de un operador instruido, capacitado e idóneo para manejarlo y la puesta a punto para realizar productos lleva horas. En la impresora 3D es necesario saber de diseño y algunas cuestiones relacionadas con la automatización de la máquina.

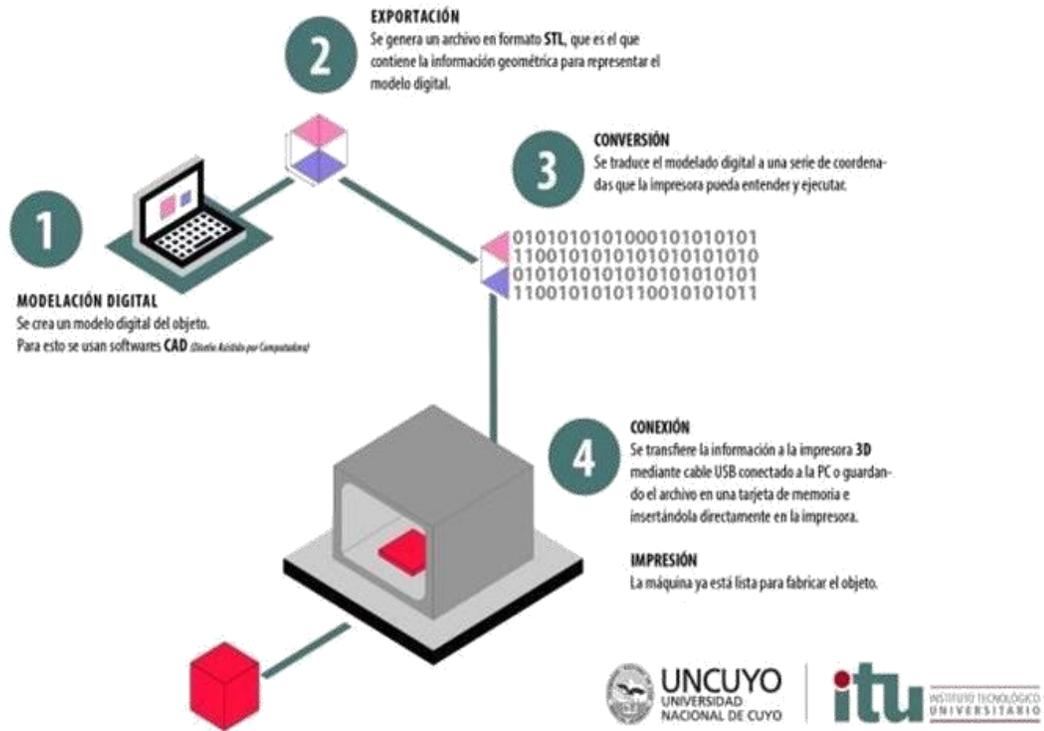


Figura 8. Esquema de funcionamiento de la impresión 3D (Olguin, 2016).

1.4. Servomecanismo

Un servomecanismo es un dispositivo automático que permite controlar la posición, velocidad, aceleración y fuerza de un mecanismo de accionamiento por medio de información que es retroalimentada. existen distintos tipos de servomecanismos, y los más típicos dan movimiento lineal mediante el uso de husillos de bolas o motores lineales (Min & Sung. 2006).

Un servomecanismo que es accionado por husillo de bolas como se muestra en la Figura 9, se compone de mecanismos de accionamiento tales como tornillos de bola y tuercas

esféricas, sensores de retroalimentación, controladores de movimiento. El servomecanismo está dividido en dos partes:

- En un subsistema mecánico compuesto por la estructura mecánica y el mecanismo de conducción.
- En un subsistema de control que consiste en sensores de retroalimentación y controladores de movimiento.

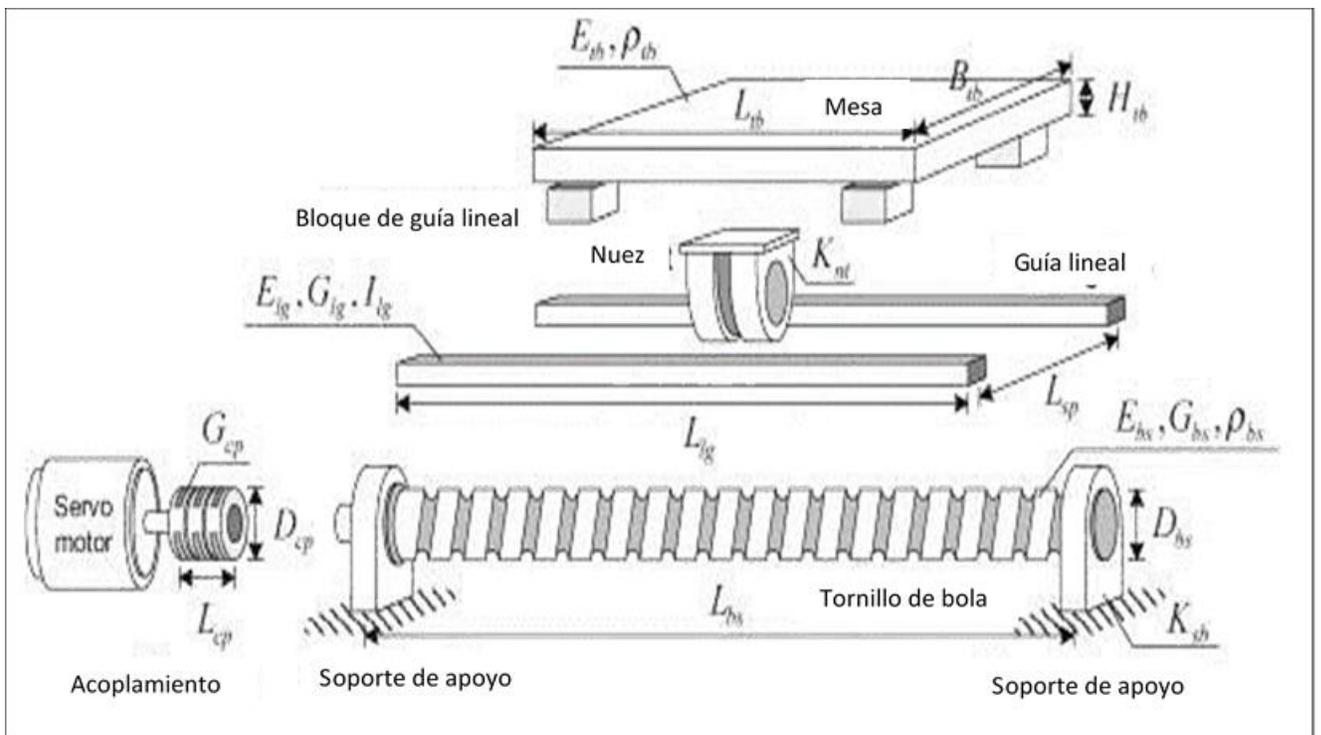


Figura 9. Esquema de un servomecanismo accionado por husillo de bolas (Min & Sung. 2006).

El rendimiento de un servomecanismo depende en gran medida de la interacción entre los subsistemas, por lo tanto, para diseñar servomecanismos de alto rendimiento, el diseño

integrado de un servomecanismo debe ir precedido de la investigación de las interacciones entre los subsistemas mecánico y de control.

1.5. Manufactura aditiva

La manufactura aditiva (MA) se denomina como, prototipos rápidos y popularmente como impresión en 3D. El término prototipo rápido (PR) es utilizado en una gran variedad de industrias para describir un proceso rápido o partes del antes de su liberación o comercialización. En otras palabras, se enfoca en la creación de “algo” de forma rápida y cuya salida es un prototipo o base de un modelo que se deriva del producto final. (Plastics Technology México , 2016)

La MA se refiere cada vez más a una variedad de tecnologías que se utilizan para fabricar modelos físicos, prototipos o componentes funcionales por medio de un Diseño Asistido por computadora (CAD 3D). Utiliza comúnmente términos incluidos en prototipos rápidos (RP) y en manufactura rápida (MR). En MA, los objetos físicos se construyen capa por capa.

Actualmente, esta tecnología puede ahora producir objetos con una amplia variedad de materiales que van desde polímeros blandos y flexibles a altas aleaciones de metales de alto rendimiento. La MA se ha aplicado con éxito en la medicina desde principios de 1990. Inicialmente, los procesos de PR se utilizaron en estereolitografía, donde se realizaron modelos en 3D con una gran precisión de la anatomía de un esqueleto, a partir de datos de una tomografía Tridimensional Computarizada (TC). A este proceso se ha hecho referencia como modelado médico o biomodelado, la cual ha llegado a ser ampliamente aceptado como una buena práctica, ya que en varios artículos de investigación se reportan casos de éxito y los beneficios obtenidos sobre todo en cirugía cráneo-maxilofacial. Los modelos médicos se han utilizado típicamente para planificar, ensayos de cirugía y en el diseño y fabricación de prótesis personalizadas.

Las tecnologías de MA también se han aplicado directamente para la fabricación personalizada de dispositivos médicos; por ejemplo, en prótesis facial, marcos de prótesis parciales removibles, guías quirúrgicas e incluso implantes directamente desde datos de CAD en 3D. (COTEC, 2011)

Las tecnologías de MA pueden variar de acuerdo con los siguientes parámetros:

- Costo: Desde algunas máquinas que emplean tecnologías más caras, como el láser, que va a costar más que otras.
- Tipo de material: Algunas máquinas sólo pueden procesar uno o dos materiales, mientras que otros pueden procesar más, incluyendo materiales compuestos.
- Mantenimiento: Algunas máquinas son más complejas que otras, por lo consiguiente el mantenimiento aumentan en el costo.
- Velocidad: Debido a las tecnologías aplicadas, algunas máquinas construyen piezas más rápido que otras.
- Versatilidad: Algunas tienen parámetros de configuración complejas donde parte la calidad, esto puede equilibrarse con otros parámetros, como la velocidad de generación.
- Espesor: Algunas máquinas tienen una limitación en el espesor de la capa debido a los parámetros de procesamiento del material.
- Precisión: Aparte del espesor de la capa, en el plano de resolución también tiene un impacto en exactitud. Por ejemplo, los sistemas basados en láser tienen un tamaño mínimo que se basa en el diámetro del haz del láser.

1.6. G code

El G-Code (o código G, en castellano) es el nombre de un lenguaje de descripción de operaciones para máquinas de control numérico por ordenador (CNC) que puede ser usado también como lenguaje de programación para controlar estos dispositivos para simplificar operaciones utilizando, por ejemplo, bucles. (Rodríguez, 2008)

Desde que se estandarizó en los 80 como ISO 6983, el G-Code es el lenguaje de control más utilizado en la fabricación por ordenador. Aunque existen ampliaciones e implementaciones de algunos fabricantes, así como estándares alternativos al internacional en algunos países, es más que probable que cualquier máquina de control numérico moderna sepa interpretar el G-Code básico.

El G-Code se almacena en un formato de texto, es decir, que puede leerse y ser modificado con un editor de texto plano, aunque lo más habitual es que se genere y se visualice desde una aplicación de modelado y/o fabricación 3D o alguna herramienta o accesorio específico.

El G-Code describe el movimiento y las diferentes operaciones que la máquina CNC debe realizar para la fabricación del objeto que se describe.

Actualmente el G-Code se ha popularizado en gran medida gracias a la impresión 3D, en ese uso el G-Code especifica dónde posicionar el extrusor, en horizontal y vertical, cuánto calentarlo y cómo disponer el filamento entre otras cosas. Las impresoras 3D suelen ser sistemas de 3 ejes: X, Y (plano) y Z (altura) Los sistemas de 4 o 5 ejes añaden información sobre giros de los cabezales de fabricación, y están presentes, por ejemplo, en tornos y fresadoras CNC.

Los programas de fabricación asistida por ordenador (CAM) suelen generar directamente documentos con las instrucciones G-Code para controlar los sistemas de fabricación (mecanizado, tradicionalmente) es decir, documentos G-Code. Los programas genéricos de modelado tridimensional no siempre tienen prevista esta opción por lo que se utiliza un formato intermedio (el más común es el STL) que puede ser leído por aplicaciones específicas que generan el G-Code para la fabricación. Este proceso se llama comúnmente laminado.

Junto con las impresoras 3D de código libre se han popularizado programas de modelado 3D también libres como FreeCAD y otros como Cura de Ultimaker (quizá no tan libre) para generar el código G para la impresión 3D, es decir, para laminar.

1.6.1. Intrusiones G code

Las siguientes intrusiones son ejemplo de comandos en G code para impresión 3D: (Rodríguez, 2008)

- G21; trabajar con milímetros
- G90; usar posicionamiento absoluto
- M82; colocar el extrusor en posicionamiento absoluto
- M107; apagar ventilador

- G28 X0 Y0; mover el extrusor a la posición 0,0 del plano
- G28 Z0; bajar el extrusor hasta la posición 0 en altura
- G92 E0; iniciar la extrusión a 0
- G1 F200 E3; extruir 3 mm de filamento
- G92 E0; resetear la extrusión a 0
- G1 F9000; establecer velocidad a 9000 milímetros/minuto
- M117 Imprimiendo...; escribir mensaje en el LCD
- G0 F9000 X58.972 Y85.198 Z0.300; posicionamiento rápido en 58.972,85.198,0.300
- G1 F1200 X60.320 Y84.421 E0.02927
- G1 X61.800 Y83.771 E0.05967; posicionar en 61.800,83.771 y extruir a 0.05967
- G1 X63.363 Y83.286 E0.09046; posicionar en 63.363,83.286 y extruir a 0.09046
- M106 S127; encender ventilador a la mitad de potencia (127)
- G0 F9000 X62.284 Y90.092 Z0.400; posicionar rápidamente en 62.284,90.092,0.400
- G1 F540 X61.718 Y90.448 E4.19702; posicionar en 61.718,90.448 y extruir a 4.19702
- G1 X61.271 Y90.723 E4.20031; posicionar en 61.271,90.723 y extruir a 4.20031
- G1 X60.679 Y91.092 E4.20468; posicionar en 60.679,91.092 y extruir a 4.20468
- M104 S0; apagar extrusor
- M140 S0; apagar la cama caliente
- G1 E-1 F300; retraer filamento (para liberar presión)
- G28 X0 Y0; mover a 0,0
- M84; apagar motores

1.7. Pruebas mecánicas

Muchos materiales cuando están en servicio están sujetos a fuerzas o cargas. En tales condiciones es necesario conocer las características del material para diseñar el instrumento donde va a usarse de tal forma que los esfuerzos a los que vaya a estar sometido no sean excesivos y el material no se fracture. El comportamiento mecánico de un material es el reflejo de la relación entre su respuesta o deformación ante una fuerza o carga aplicada. El área de aplicación de los materiales depende, en gran parte, de sus propiedades mecánicas

tales como resistencia, dureza, ductilidad, etc. Es posible obtener valores numéricos que describan estas propiedades con las siguientes pruebas:

- Prueba de tensión o compresión: Da la capacidad de un material para soportar una carga estática. En la Figura 10 se puede observar un esquema de la aplicación de la carga (p) en algunos ensayos a carga estática.
- Prueba de dureza: Resistencia a deformarse permanentemente.
- Cargas de choque: Determina la tenacidad del material.
- Prueba de fatiga: Mide el periodo de vida útil de un material sometido a carga y temperatura.
- Prueba de fluencia y ruptura: Evalúa el comportamiento de un material sometido a una carga elevada.

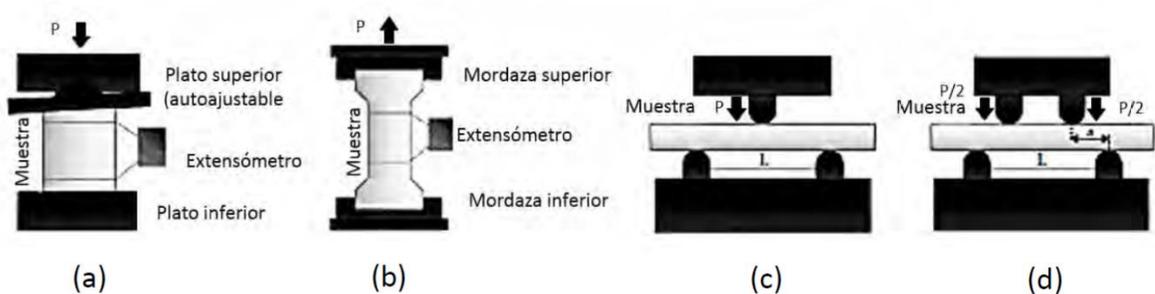


Figura 10. Representación esquemática de algunos ensayos a carga estática, (a) compresión, (b) tensión o tracción, flexión en (c) 3 y (d) 4 puntos (Kuhn & Medlin, 2000).

Los términos ensayo de tensión y ensayo de compresión se usan normalmente a la hora de hablar de ensayos en los cuales una probeta preparada es sometida a una carga uniaxial gradualmente creciente (estática) hasta que ocurre la falla. En un ensayo de tensión simple, la operación se realiza sujetando los extremos opuestos de la pieza de material y separándolos. En un ensayo de compresión, se logra sometiendo una pieza de material a una carga en los extremos que produce una acción aplastante. En un ensayo de tensión, la probeta se alarga en una dirección paralela a la carga aplicada; en un ensayo de compresión, la pieza se acorta. Dentro de los límites de lo práctico resultante de la carga se hace coincidiendo con el eje longitudinal de la probeta.

1.7.1. Pruebas mecánicas con máquina universal

Una máquina universal es semejante a una prensa, pero a diferencia de esta, posee la facultad para realizar diversos tipos de ensayos mecánicos, tales como ensayo de compresión, tensión, torsión, etc. (es por ello que se denomina universal). La máquina universal es utilizada en la caracterización de nuevos materiales y es considerada como el estándar industrial. La máquina universal está compuesta por una cruceta que se desplaza verticalmente hacia arriba o hacia abajo, aplicando una fuerza controlada de tracción o compresión sobre la probeta a evaluar y la cual es leída mediante una celda de carga (Kuhn & Medlin, 2000).

Dependiendo del rango de la fuerza aplicada a la probeta, las maquinas universales se clasifican en hidráulicas y electromecánicas. Las maquinas electromecánicas pueden aplicar hasta una fuerza de 0.135×10^6 lbf, mientras que las maquinas hidráulicas permiten aplicar fuerzas de hasta 1×10^6 lbf. Para realizar una prueba mecánica es necesario colocar aditamentos en la máquina como mordazas para la prueba de tensión (Figura 11a), soportes de apoyo en el caso de la prueba de compresión (Figura 11b). En la Figura 11c y 11d se muestran los aditamentos para las pruebas de flexión de 3 y 4 puntos respectivamente.

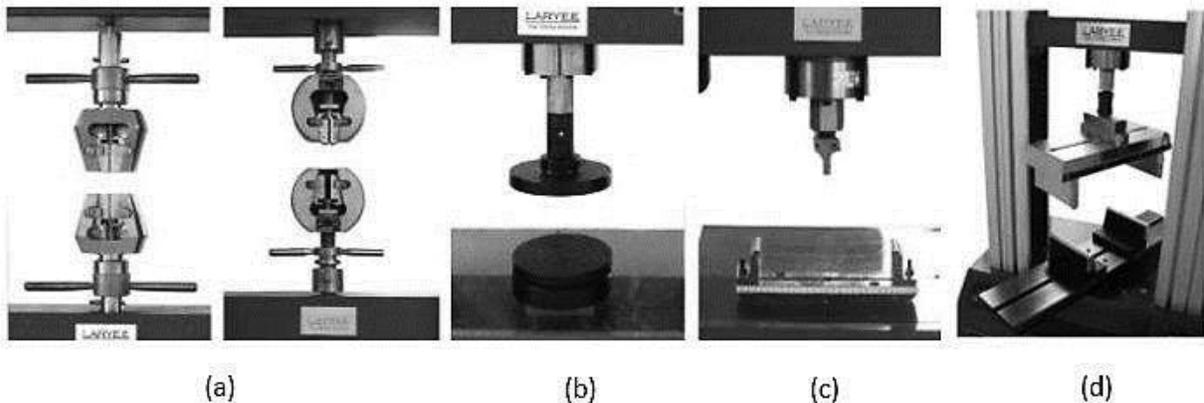


Figura 11. Aditamentos de una maquina universal utilizados para las pruebas de (a) tensión, (b) compresión, flexión de (c) 3 y (d) 4 puntos (Kuhn & Medlin, 2000).

En la Figura 12 se muestra la estructura mecánica básica para una máquina universal electromecánica. El desplazamiento de la cruceta es mediante dos husillos que rotan por la acción de un motor.

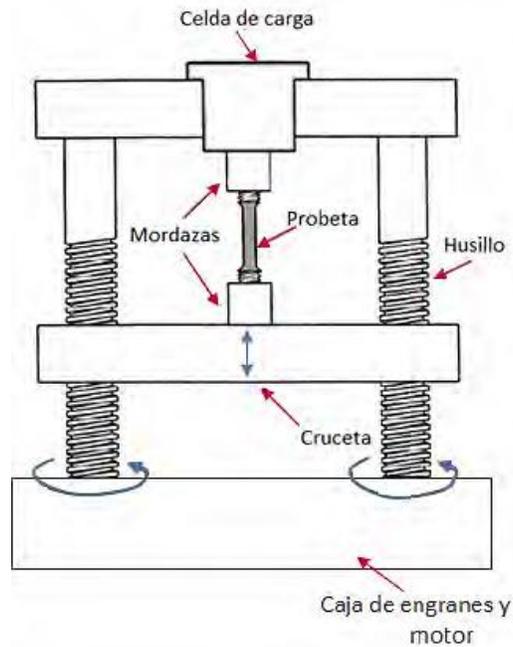


Figura 12. Esquema de la estructura mecánica básica de una máquina universal electromecánica (Kuhn & Medlin, 2000).

1.7.2. Esfuerzo deformación

El comportamiento mecánico de un material está principalmente dado por la relación que guarda entre el esfuerzo y la deformación. Esto para un estado general de carga y por un criterio de rotura que controla el fallo del mismo. Si una fuerza es estática o cambia de forma relativamente lenta con el tiempo y es aplicada uniformemente sobre una sección del material, el comportamiento mecánico del material puede ser estimado mediante un simple ensayo *esfuerzo-deformación*. Utilizando una máquina universal se puede obtener el diagrama de esfuerzo-deformación unitario.

Dependiendo de las características de la máquina universal, este diagrama se puede obtener

en uno o dos pasos. Cuando la máquina solo registra la fuerza aplicada, se calcula el esfuerzo (σ), que es la fuerza (F) actuando por unidad de área (A), como se muestra en la Ecuación 1.

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

Ecuación 1. Esfuerzo deformación.

Utilizando el módulo de elasticidad del material y la ley de Hooke se calcula la deformación. En la Figura 13 se observa la curva esfuerzo-deformación, donde el eje de las abscisas corresponde a la deformación unitaria y el eje de las ordenadas a el esfuerzo unitario (Gere & Goodno, 2009).

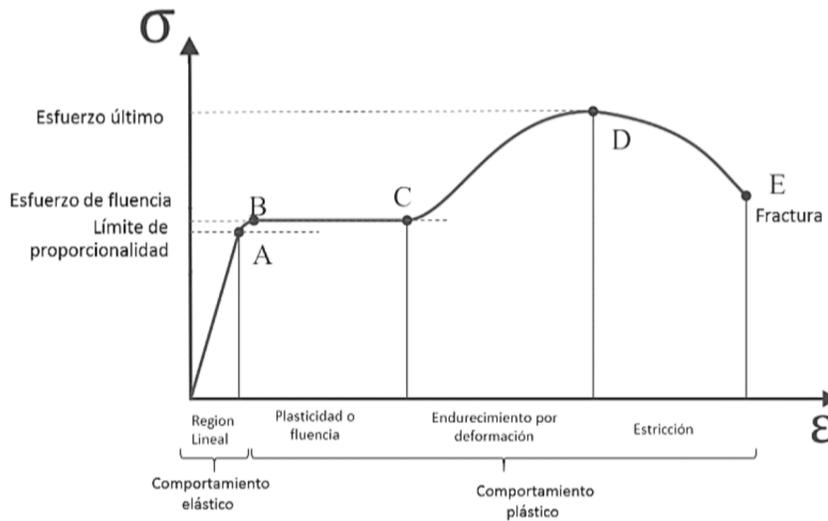


Figura 13. Diagrama esfuerzo (σ) - deformación (ϵ) unitarios (Gere and Goodno, 2009).

La alteración de la forma o dimensiones de un cuerpo como resultado de las tensiones aplicadas se le denomina deformación. Los esfuerzos de tracción causan en la pieza una elongación perpendicular a su propia dirección, mientras que los de compresión dan lugar a una contracción.

1.7. Antecedentes

Andamios impresos para la generación de tejidos menisco

En la Universidad de Alberta Edmonton Canadá (Szojika et al. 2017), mediante el escaneo con láser de una muestra de menisco fresco de una oveja esqueléticamente madura se obtuvo un modelo de superficie 3D en formato de estereolitografía, que fue convertido en un modelo sólido, mediante el cual se diseñaron e imprimieron en 3D andamios de policaprolactona que recapitulan la forma y los componentes estructurales de la matriz extracelular del menisco para proporcionar una plantilla y soporte estructural para la regeneración completa del menisco a partir de células.

Los andamios de menisco se produjeron capa por capa con una arquitectura de fibra biomimética inspirada en los haces de fibras de colágeno orientadas circunferencialmente y radialmente que se encuentran en el tejido nativo. Se incorporaron pestañas de sutura para facilitar la fijación en los cuernos del menisco y las conexiones coronarias. Estos andamios fueron diseñados para tener una interconectividad de poro del 100% y una porosidad del 61%. El módulo de compresión de equilibrio al 10% de la deformación de la arquitectura del andamio de menisco fue 18.8 ± 3.1 MPa (media \pm desviación estándar, $n = 3$).

Además, se caracterizó la fibra de andamio de policaprolactona impresa en 3D con diferentes espaciamientos de fibra, desplazamientos entre capas y orientaciones circunferenciales en términos de su módulo de compresión de equilibrio.

Fundamentos y aplicaciones de la impresión 3D para materiales novedosos

Esta investigación (Lee et al. 2017) proporciona una comprensión básica de los fundamentos de los procesos de impresión en 3D y el reciente desarrollo de nuevos materiales de impresión en 3D, tales como materiales inteligentes, materiales cerámicos, materiales electrónicos, biomateriales y compuestos.

En esta investigación se centran en el último desarrollo de nuevos materiales y sus aplicaciones en el campo de la impresión 3D. El desafío clave es resolver la capacidad de

impresión en 3D de los materiales avanzados sin incluir las propiedades del material original. La mejora del rendimiento y las nuevas aplicaciones se habilitan principalmente a través de diseño y optimización de forma libre. Por ejemplo, la impresión 3D de materiales inteligentes resulta en aplicaciones de impresión 4D, mientras que la impresión 3D de biomateriales conduce a aplicaciones de bio-programa.

Optimización del uso del material en la impresión 3D a través de un algoritmo de simulación física

En esta investigación (Asadi et al. 2016) se diseña un algoritmo para un sistema de patrones de relleno basado en estructuras para piezas impresas en 3D a gran escala. Donde crea un sistema simple, modular y expansible que considera la lógica estructural de las partes imprimibles a través de la modelización de modelos virtuales 3D en una representación de elementos finitos que se utiliza para alimentar un modelo de resorte.

El algoritmo analiza un modelo 3D formateado como una malla, que crea una serie de puntos basados en el cuadro delimitador del objeto, se considera una distancia de división que se utiliza para calcular la cantidad de puntos que se crean en cada dirección. Como resultado, se crea un cubo de punto tridimensional. Estos puntos se utilizan para caracterizar el objeto de la forma, y se convertirán completamente en puntos de análisis estructural.

Una vez que los puntos han sido calculados y almacenados en una lista, el algoritmo crea una etiqueta especial para cada uno, describiendo si están o no contenidos dentro del objeto real. Se muestran las propiedades del material y la personalización del usuario. Varias soluciones específicas, capacidades de optimización y resultados de simulación se prueban y se muestran. El uso de diseños de boquillas no estándar y personalizadas y materiales de impresión se discute para otras capacidades de uso.

sistema de posicionamiento aplicado a la técnica de impresión 3d modelado por deposición fundida

En esta investigación (Torres et al. 2012) se presenta el diseño y construcción de un sistema mecánico de posicionamiento, el cual es parte de un prototipo mecatrónico que integra las áreas de electrónica, mecánica, control e informática, formando una máquina automatizada

que responde a las necesidades técnicas y requerimientos de una impresora 3D, que aplica la técnica de prototipado rápido o modelado por deposición fundida (FDM).

El diseño del sistema está formado en base al sistema referencial cartesiano tridimensional, con movimiento de cada eje, de forma independiente, teniendo en cuenta que la deposición de material se hace sobre el plano horizontal X, Y y que el desplazamiento vertical Z obedece al espesor de la capa del material depuesto. Los datos de impresión son proporcionados por un algoritmo seccionador por capas que determina las secciones transversales de la pieza, esto se obtiene de la conversión del archivo STL a código G, que determina las coordenadas de posición para la impresión en 3D, la velocidad de movimiento, distancia entre capas y la actividad del extrusor de material.

El diseño del sistema de posicionamiento se aplica a un mecanismo motor, piñón correa dentada. Donde se utiliza el algoritmo de Bresenham (Kenneth, 2002), que garantiza el seguimiento de trayectorias y la minimización del error, ya que el algoritmo considera para el movimiento entre dos puntos del plano XY, una línea que va desde el punto inicial (x_1, y_1) hasta el punto (x_2, y_2) , y a partir de estos puntos calcula la pendiente entre los puntos X y puntos Y, para establecer el eje conductor.

Metodología de diseño integrado de servomecanismos accionados por husillo de bolas con controladores discretos. Parte I: Modelado y análisis de rendimiento

En esta investigación (Min & Sung. 2006) se describe una metodología de diseño integrado donde se diseñan mecanismos de accionamiento y controladores de movimiento. En esta metodología los controladores de realimentación y retroalimentación descritos en el dominio de tiempo discreto se incorporan en el controlador de movimiento.

En la metodología descrita se lleva a cabo la descripción de requisitos tales como el diseño del servomecanismo, estabilidad, errores en la geometría, la resonancia producida en el mecanismo de accionamiento, la deformación de la estructura, la saturación del actuador. Se llevan a cabo simulaciones numéricas del rendimiento del servomecanismo de acuerdo con el diseño y los parámetros de operación que se realizan en base al modelo matemático desarrollado.

En esta metodología se emplea un proceso de identificación preciso del mecanismo de conducción para verificar el modelo del subsistema matemático. Además, se realizan experimentos de tipo movimiento circular que permiten investigar las interacciones entre los parámetros del mecanismo de accionamiento y las ganancias del controlador, y para analizar la influencia de las interacciones en el rendimiento del servomecanismo.

En esta metodología mediante los resultados del análisis y los experimentos permiten comprender las características dinámicas precisas del servomecanismo accionado por husillo de bolas y hacen posible un diseño integrado.

Monitoreo de la condición de la boquilla en impresión 3D

En esta investigación (Yedige et al. 2018) se propone una técnica de monitorización de la condición de la boquilla en la impresión 3D de fabricación por filamento en impresoras funcionales actuales. Esta técnica propuesta afecta la calidad de las piezas de prototipado en tolerancia geométrica, rugosidad superficial y propiedades mecánicas.

En la técnica propuesta de monitorización de la condición de la boquilla se utiliza un sensor de vibración, acoplado a un soporte de barra que soporta el extrusor. Se diseñó y construyó una nueva impresora 3D con un extrusor fijo y una plataforma móvil para llevar a cabo experimentos de monitoreo de la condición de la boquilla. Se simuló la posible obstrucción de las boquillas mediante la reducción de la temperatura de extrusión de la boquilla, lo que provocó la solidificación parcial del filamento alrededor de las paredes internas de la boquilla, y finalmente se realizaron una serie de experimentos donde se midieron las vibraciones del soporte de barra durante la extrusión de ácido poliláctico, Acrilonitrilo butadieno estireno y filamentos SemiFlex a través de los tipos Direct y Bowden de los extrusores de fabricación mediante filamentos fusionados.

En la investigación mediante los estudios de los resultados se halló que las obstrucciones en las boquillas de las impresoras 3D de fabricación por filamento en impresoras funcionales actuales, se pueden controlar utilizando un sensor acelerómetro y midiendo las vibraciones del soporte de la barra del extrusor.

2. Metodología

En esta propuesta se plantea una metodología a base de conocer la tecnología actual de impresión 3D, a base de obtener la información inicial que permita plantear una secuencia de acciones para llevar a cabo el proyecto teniendo éxito. Posteriormente planteadas las acciones se continúa con una investigación basada en experimentar con la tecnología presente de impresión 3D, con el control de sus variables físicas y el control experimental de variables internas en el procesado 3D. Finalmente una serie de caracterizaciones de mecánica y morfología para comprobar el efecto del control propuesto.

2.1. Construcción de una impresora 3D de arquitectura cartesiana

Primeramente, se realiza un análisis de los dispositivos de impresión 3D que actualmente se encuentran en el mercado desde dispositivos de bajo coste a dispositivos con un mayor coste, esto para conocer cómo es que trabaja el extrusor en conjunto con los ejes de posicionamiento ya que es un proceso clave en la impresión 3D y se requiere precisión para tener buenos acabados, además de conocer cómo se van adhiriendo las capas de material una sobre otra sin que la estructura colapse sobre sí misma así como conocer los tiempos de enfriamiento o endurecimiento del material al ser depositados.

El dispositivo 3D se construyó sobre un prototipo de impresión 3D ya existente en el CFATA donde se utilizarán motores a pasos NEMA 17 y mecanismos tipo tornillo sin fin relación de 5:1 para el movimiento de los ejes y acrílico para la construcción de la estructura como se describe a continuación, ver Tabla 3:

- Eje cartesiano X. Este eje de movimiento se compone por un mecanismo que transforma el movimiento de rotación de dos motores a pasos bipolares SM-42BYG011-25EN acoplados en serie a un movimiento lineal mediante un tornillo sin fin, un motor en cada extremo del tornillo sin fin como se muestra en la Figura 14, desplaza la cama de impresión mediante un husillo de bolas y se guía mediante un par de barras lisas.



Figura 14. Mecanismo eje X.

- Eje cartesiano Y. Este eje de movimiento se compone por un mecanismo que transforma el movimiento de rotación de dos motores a pasos bipolares SM-42BYG011-25EN acoplados en serie a un movimiento lineal mediante un tornillo sin fin, un motor en cada extremo del tornillo sin fin como se muestra en la Figura 15, desplaza el eje X mediante un husillo de bolas y se guía mediante un par de barras lisas.

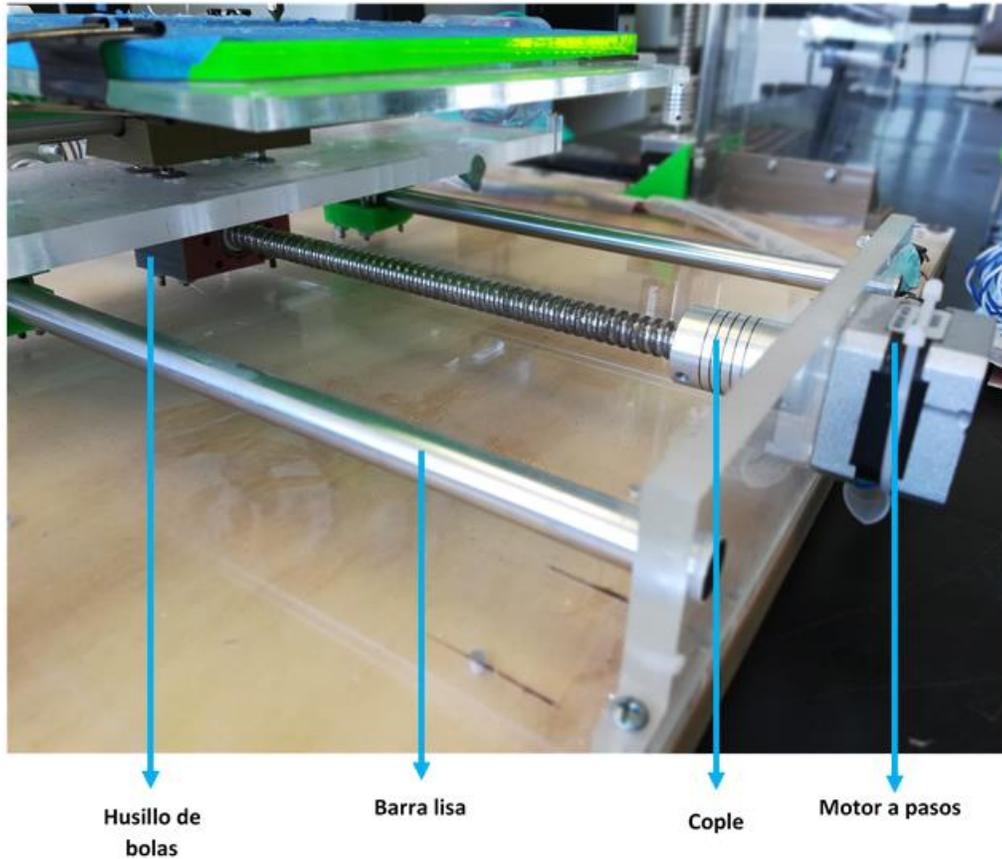


Figura 15. Mecanismo eje Y.

- Eje cartesiano Z. Este eje de movimiento se compone por un mecanismo que transforma el movimiento de rotación de dos motores a pasos bipolares SY42STH47-1206A en paralelo a un movimiento lineal mediante dos tornillos sin fin, acoplados cada uno a un tornillo sin fin como se muestra en la Figura 16, desplaza el eje que sostiene el extrusor mediante un par de husillo de bolas y se guía mediante barras lisas.

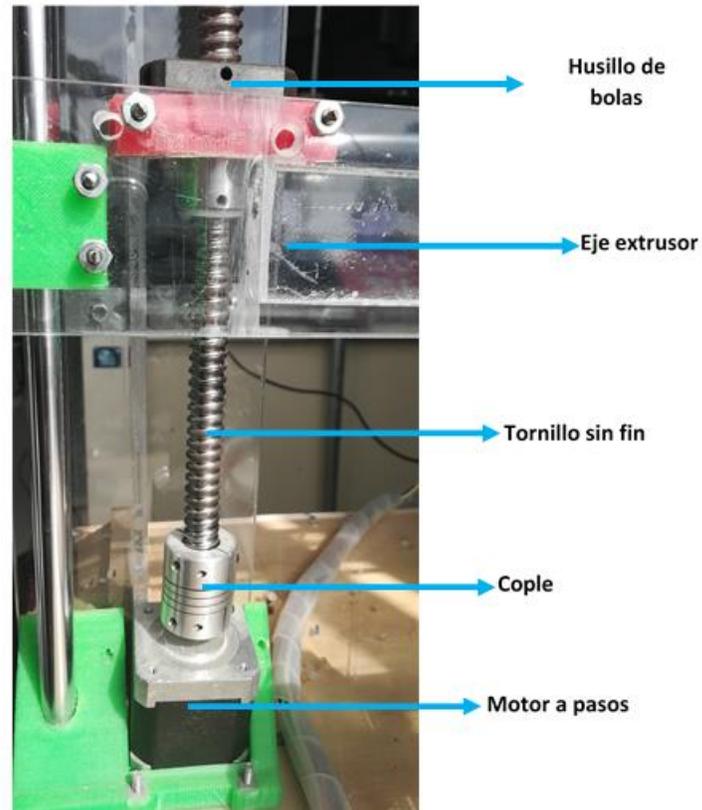


Figura 16. Mecanismo eje Z.

- Eje de extrusión E. Este eje de extrusión o empuje de filamento se compone de un mecanismo que permite crear empuje mediante el movimiento de rotación de un motor a pasos bipolar YH42BYGH47 acoplado a una polea de empuje, además de un módulo de disipación de calor compuesto por disipador de aluminio y ventilador como se muestra en la Figura 17.

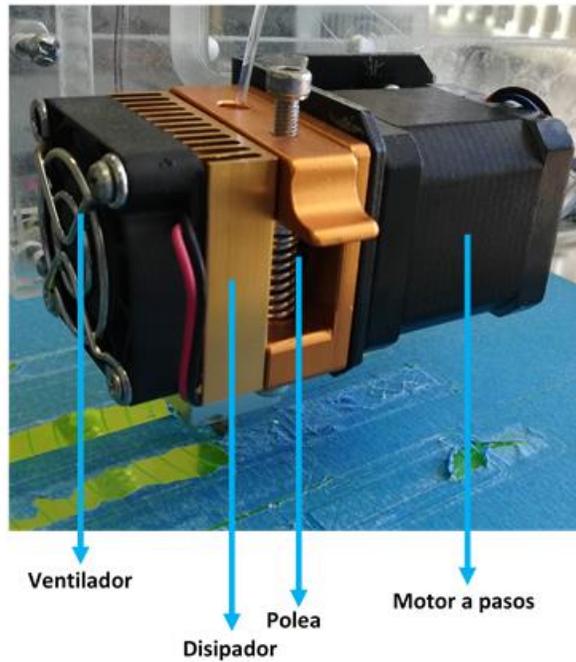


Figura 17. Extrusor de polea eje E

- Hotend. Se compone de una boquilla de 0.4 mm acoplada sobre un bloque calentador con termo Resistencia y termopar tipo K, además cuenta con una guía para el filamento y un disipador de calor de aluminio acoplado a un ventilador como se muestra en la Figura 17.
- Cama de impresión. El área de impresión está construida de acrílico recubierta de cinta para impresión 3D la cual permite una mejor adherencia del material a la hora de imprimir, además esta acoplada sobre el eje X como se muestra en la Figura 18.

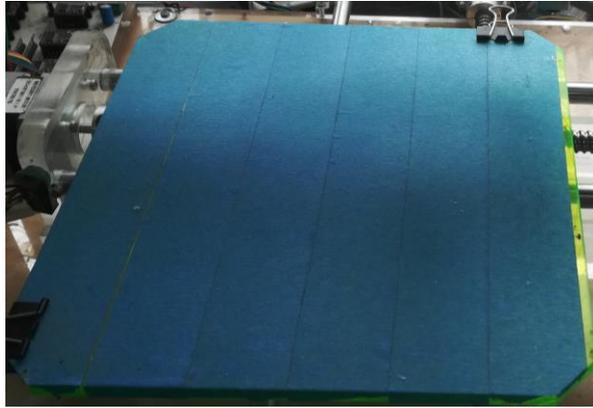


Figura 18. Área de impresión

En el sistema de deposición de filamento se utilizó un extrusor directo como se ve en la Figura 17, para el sistema de calor del extrusor se implementará un controlador de temperatura mediante termo resistencia y microcontrolador, para la parte de control del sistema de impresión 3D se implementará un sistema de red de microcontroladores.

Tabla 3. Características materiales

Elemento	Material	Característica
Tornillo sin fin	Acero	E=200Gpa Cubierta galvanizada Gran dureza Buena plasticidad
Barra lineal	Acero	E=200Gpa Cubierta de cromo Gran dureza Buena plasticidad
Husillo de bolas	Acero	E=200Gpa Gran dureza Buena plasticidad
• Bolas	Acero	E=200Gpa Gran dureza Buena plasticidad
• Guía de rodadura	PVC	E=2.4Gpa Resistencia química Dureza Buen aislante
Coples	Aluminio	E=70Gpa Ligero Anticorrosivo Buen disipador de calor
Estructura	Acrílico	E=6Gpa Ligero Resistencia química Resistencia a la intemperie Resistencia al impacto

2.2. Electrónica

El control del dispositivo se construyó mediante una red de microcontroladores basados en el protocolo de comunicación I2C a 10 bits mediante un maestro basado en microcontrolador PIC18F4550 ver Tabla 4 esclavos basados en microcontrolador PIC18F2550 los cuales

controlan dos drivers para motor a pasos ver Tabla 5 cada uno, además de que un esclavo se encarga de controlar la temperatura como se muestra en la Figura 19.

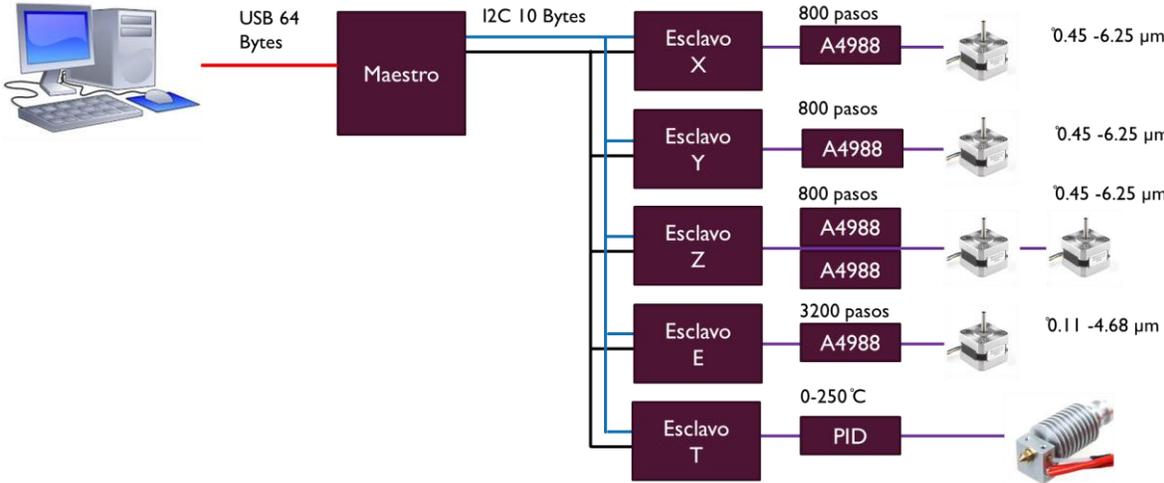


Figura 19. Red electrónica de control

Tabla 4. Características microcontrolador PIC 18F4550

Característica	PIC 18F4550
Frecuencia de operación	48 MHz
Módulo USB	2.0
• Low speed	1.5Mb/s
• Full speed	12Mb/s
Memoria de doble acceso vía USB	1 KB
Pines I/O	35
• Puertos	A,B,C,D,E
Memoria de programa flash	32 KB
Memoria RAM	2048 Bytes
Memoria EEPROM de datos	256 Bytes
Velocidad de la CPU	12 MIPS
Oscilador interno seleccionable	31kHz-8MHz
Oscilador secundario con Timer 1	32kHz
Opciones de oscilador	Dual
ADC	10 bits
• Canales	13
Tecnología nano Watt	Ahorro de energía
Voltaje de operación	4.2V a 5.5V
Timers	4
	Uno de 8 bits y 3 de 16 bits
Módulos de captura/comparación/PWM	2
Protocolos	EUSART, SPP, SPI, I ² C.
Fuentes de interrupciones	20
• Externas	3
Resistencias de pull-ups programables	Puerto B
Función del pin MCLR	Opcional
Brown-out Reset	Programable
Power-on Reset	Programable
Power-up Timer y Oscilador Start-up Timer	
Memoria Flash borrado/escritura	100,000 ciclos
Memoria EEPROM borrado/escritura	1,000,000 ciclos
Retención de datos	40 años
Protección de código y datos	Programable
Encapsulado DIP	40 pines

Tabla 5. Características motores a pasos

Características	SM-42BYG011-25EN	SY42STH47-1206A	YH42BYGH47
Angulo por paso	1.8+-5%	1.8+-5%	1.8+-5%
Fases	2	2	2
Resistencia	100 Mohm	100 Mohm	1.6 ohm/fase
Peso	0.20Kg	0.365Kg	0.400Kg
Voltaje	12V	4V	24V
Corriente	0.33 A	1.2 A	1.5 A
Inductancia	46+-20% mH	2.8+-20% mH	2.8 mH/fase
Torque	0.23N.M	3.17 Kg.cm	5500g.cm

2.3. Definición de variables

Mediante el análisis de las tecnologías de impresión 3D actuales se pudieron plantear las siguientes variables a controlar:

- **Temperatura.** Es clave para el proceso de deposición ya que sin este parámetro no podría fluir el material de trabajo y es necesario tener control de esta variable para los diversos materiales que puedan utilizarse en la impresión.
- **Extrusión.** Es clave ya que es necesario empujar el material hacia la boquilla y pueda fundirse para ser depositado, y es necesario tener control preciso de esta variable ya que durante el proceso se va empujando el material en el orden de micras de metro.
- **Posición.** Es clave ya que el proceso de deposición se basa en una serie de coordenadas que pueden variar en el orden de micras de metro.
- **Procesado de texto.** Estas variables son indispensables ya que son las encargadas de traducir el código G para poder ejercer el control de las variables anteriores.
- **Reprocesado de texto.** Estas variables son claves en el nuevo sistema de procesado ya que son necesarias para aplicar un algoritmo no lineal en la forma de entramado.

- **No lineales.** Estas variables son la clave en el sistema propuesto de entramados no lineales.

2.4. Metodología de control

Se empleó una metodología de control basada en máquina de estados como se muestra en la Figura 20. Ya que la máquina de estados permite tener un orden controlado de la ejecución de programa lo que nos permite tener un control más estable del proceso.

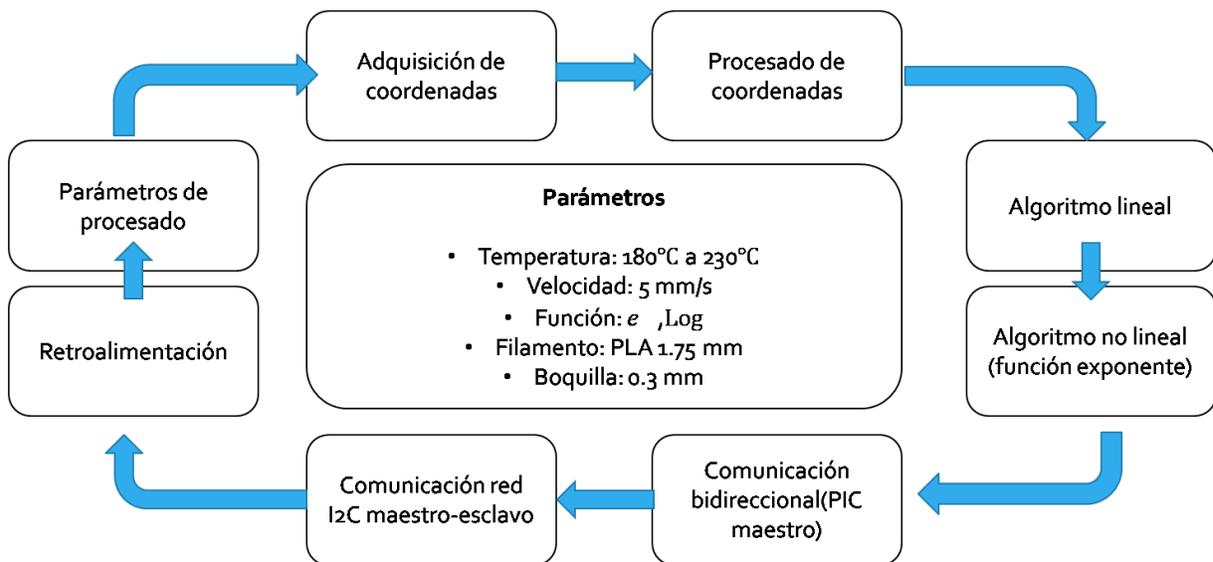


Figura 20. Máquina de estados del proceso.

Antes del control de proceso es necesario realizar los siguientes pasos:

- **Diseño CAD.** Diseñar el objeto a imprimir mediante algún software CAD o descargar un diseño ya existente.
- **Exportación STL.** Debe convertirse el diseño del objeto a imprimir en un archivo tipo STL el cual contiene la información geometría para representar el modelo digitalmente.

- **Software 3D.** Debe trabajarse el archivo STL en el software de impresión 3D Ultimaker Cura: Advanced 3D printing®.
- **G code.** Debe guardar el código generado por el software 3D en formato de texto.

2.4.1. Metodología de impresión

Para el proceso de impresión 3D se implementaron 3 algoritmos de impresión, un algoritmo dedicado a la impresión lineal o normal y 2 tipos de algoritmos para la impresión no lineal como se describen a continuación:

- **Algoritmo lineal.** Es la base de la impresión 3D lineal y no lineal, ya que se dedica a procesar el texto de entrada o código G para transmitirlo al dispositivo 3D cartesiano, dando entramados convencionales como se muestra en la Figura 21.

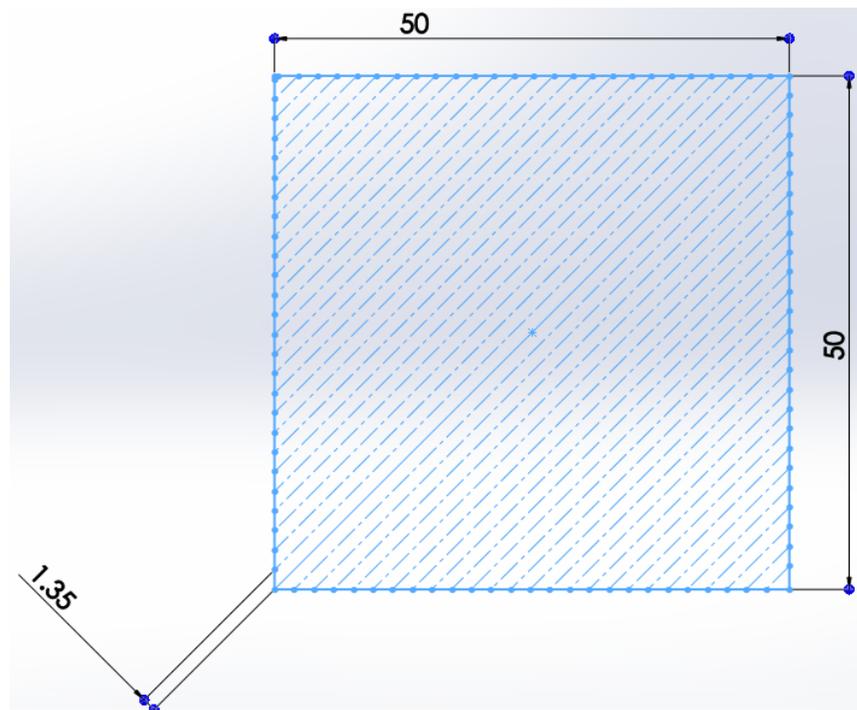


Figura 21. Entramado lineal o convencional

- **Algoritmo no lineal 1.** Este algoritmo entra después del procesamiento de texto o código G y se dedica a reprocesar el código G, primeramente, detectando los pasos de la impresión 3D los cuales son inicio de capa (; LAYER), inicio de borde adherente para

purga del extrusor (; TYPE: SKIRT), inicio de borde del objeto a imprimir (; TYPE: WALL-INNER y; TYPE: WALL-OUTER) e inicio de creación de entramado (; TYPE:SKIN). Este primer algoritmo se enfoca en el entramado ya que se detecta que debe iniciarse y lleva una cuenta de las líneas de impresión de entramado que son comparadas a las producidas por una función no lineal seleccionada previamente en la interfaz de extrusión, este algoritmo se salta los puntos de entramado no deseados mediante una retracción del extrusor para conservar el filamento.

- **Algoritmo no lineal 2.** Este algoritmo se aplica igual que el algoritmo no lineal 1, la diferencia es que, en lugar de ir saltándose los puntos no deseados, calcula los siguientes puntos deseados en comparación a la función no lineal y traza una línea recta hasta el siguiente punto deseado permitiendo tener una impresión más uniforme, y permitiendo crear entramados no lineales o no convencionales como se muestra en la Figura 22.

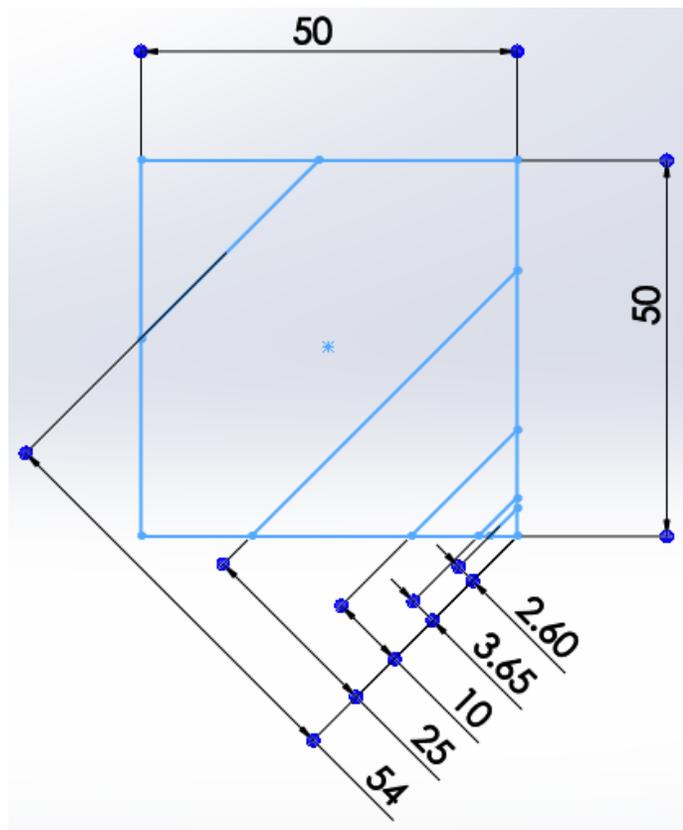


Figura 22. Configuración de entramado no lineal ejemplo logarítmico

- Comparadores. Los comparadores adquieren los datos obtenidos mediante los algoritmos no lineales y se dedican a crear una serie de datos modificados que contienen información en base a la comparación con funciones tipo logarítmica y tipo exponencial como se muestra en la Figura 23 y 24, lo que permite crear arreglos de datos que conforman los entramados de las estructuras a imprimir capa a capa siempre considerando N datos Asia adelante y hacia atrás en el tiempo, ver anexos 1 al 7.

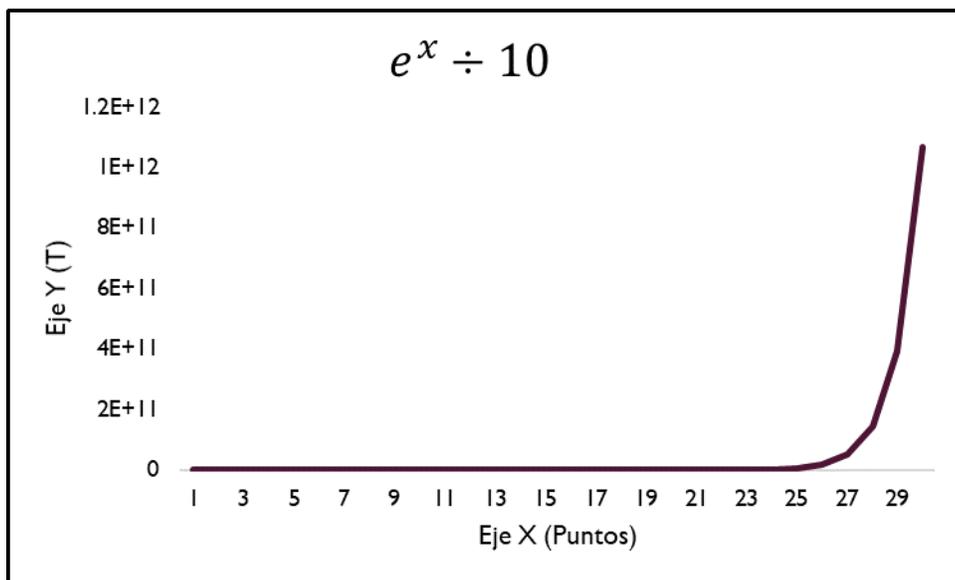


Figura 23. Función tipo exponencial

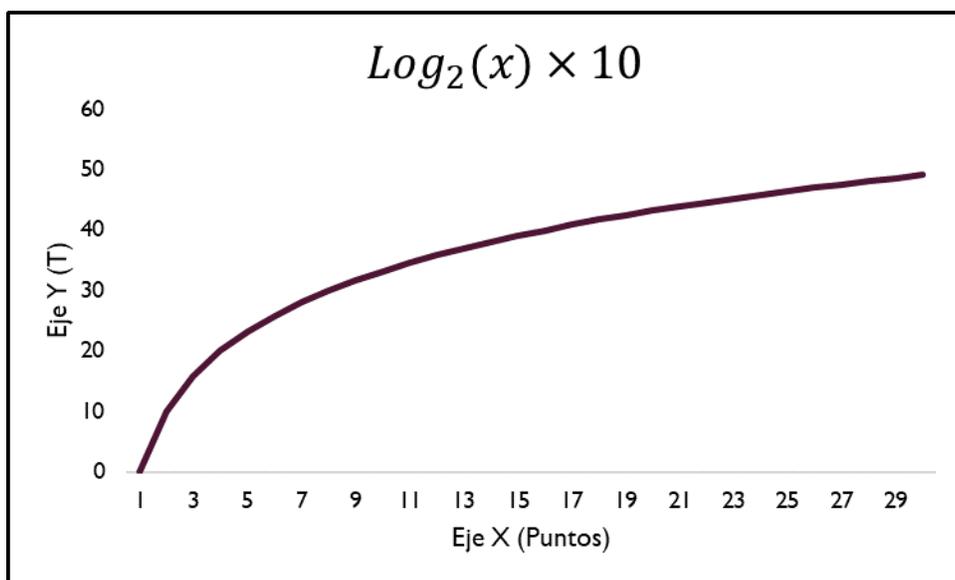


Figura 24. Función tipo logarítmica

2.5. Interfaz de control

El desarrollo de una interfaz gráfica de control es indispensable para el mejor control del dispositivo de impresión 3D, se desarrolló mediante el análisis de software libre de impresión 3D como lo es Repetier Host® y Cura®, también se analizaron los requerimientos que se deben tener para realizar una interfaz hombre máquina (HMI).

La interfaz hombre maquina (HMI) se elaboró en el software de instrumentación LabVIEW®, ya que brinda una gran variedad de herramientas para el control de dispositivos de entrada y salida, la interfaz está constituida por los controles e indicadores siguientes y como se muestra en la Figura 25:

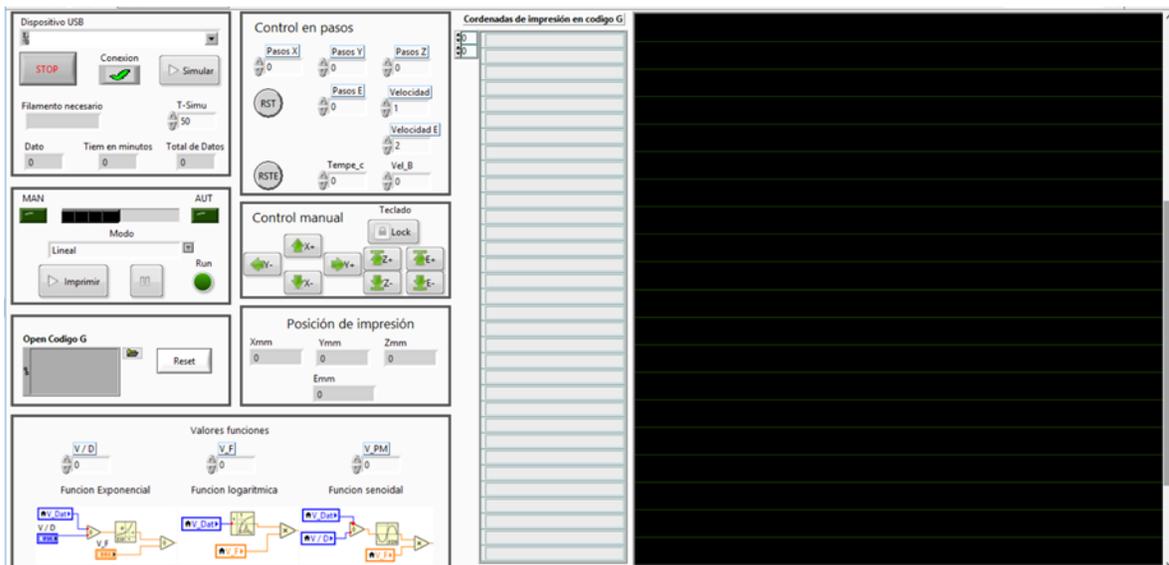


Figura 25. Interfaz de control para impresión 3D.

- **Selección y conexión del dispositivo.** Esta parte permite seleccionar el dispositivo 3D, nos permite simular la impresión mediante temporizador ajustable, y nos brinda información respecto al tiempo de impresión y filamento necesario como se muestra en la Figura 26.

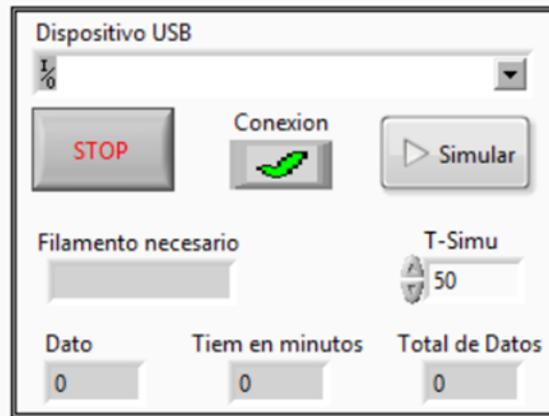


Figura 26. Bloque Selección y conexión del dispositivo.

- **Selección de impresión.** Esta parte permite seleccionar el archivo de entrada en código G, permite seleccionar la función a imprimir, nos permite iniciar y pausar la impresión como se muestra en la Figura 27.

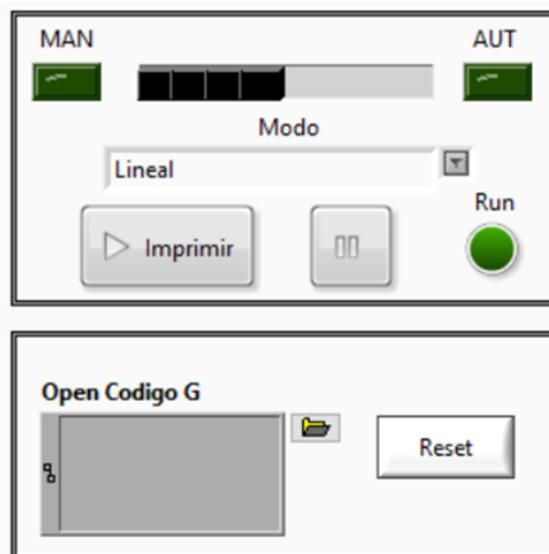


Figura 27. Selección de impresión

- **Control de posición.** Esta parte nos permite controlar los parámetros de impresión tales como punto de inicio velocidad de movimiento X, Y, y velocidad de extrusión E como se muestra en la Figura 28.



Figura 28. Control de posición.

- **Controles de ajuste del dispositivo.** Esta parte nos permite controlar los ejes cartesianos del dispositivo además del extrusor mediante botones o coordenadas como se muestra en la Figura 29.

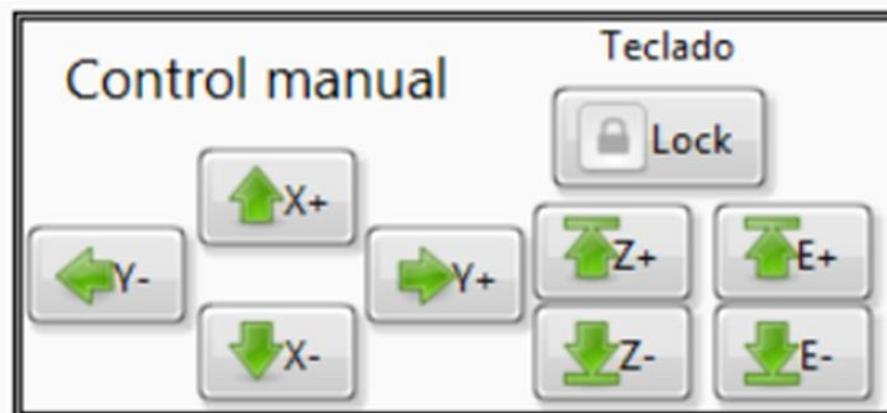


Figura 29. Controles de ajuste del dispositivo.

- Indicador de posición de impresión. Esta parte solo nos permite visualizar la impresión 3D capa a capa y nos lo muestra mediante planos 2D como se muestra en la Figura 30.

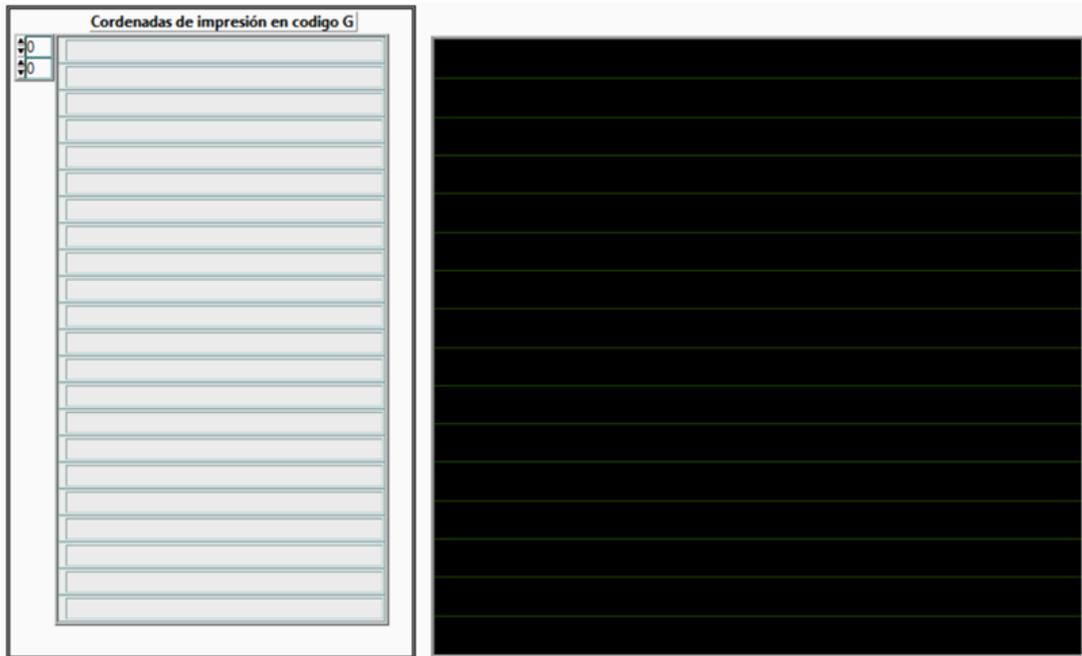


Figura 30. Indicador de posición.

2.6 Imprimir materiales en diferente configuración de entramado con ácido poliláctico.

Se parte de un diseño de probeta rectangular de un ancho de 10 mm por 40 mm de largo y 4 mm de espesor como se muestra en la Figura 31. Posteriormente se procesa en el software de impresión libre Cura®, ajustando los parámetros de diámetro de boquilla y ancho de filamento además del ajuste de densidad a 100 % y una resolución de capa normal y capa inicial de 0.15 mm.

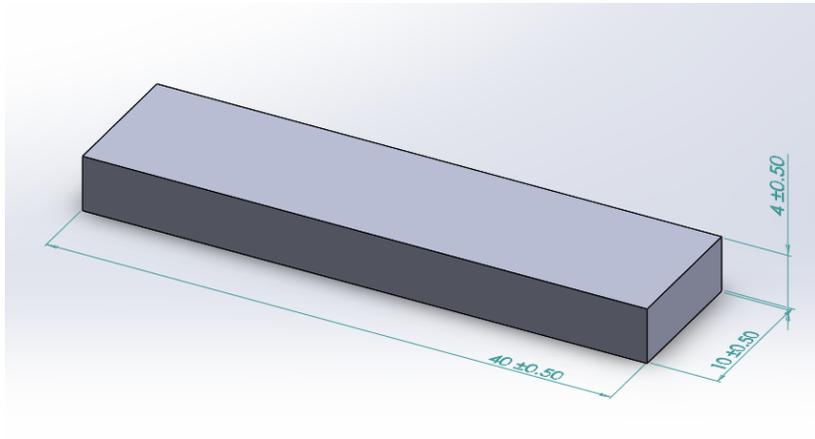


Figura 31. Probeta rectangular.

Se realizan impresiones de la probeta mencionada mediante una configuración de impresión lineal o normal como cualquier Dispositivo 3D imprimiría, para poder tener una referencia y poder ajustar el dispositivo 3D, como se muestra en la Figura 32.



Figura 32. Probeta con configuración normal.

2.6.1. Impresión logarítmica

Se realizan impresiones de la probeta mencionada mediante una configuración de entramado logarítmico véase Ecuación 2, ajustada en relación al tamaño de la probeta para poder visualizar con claridad la diferencia de entramado.

$$y = \log_2(x) * 20$$

Ecuación 2. Función logarítmica.

Mediante la función mencionada se imprimen probetas en un rango de temperatura de 180 a 200, se pueden ver en la Figura 33.

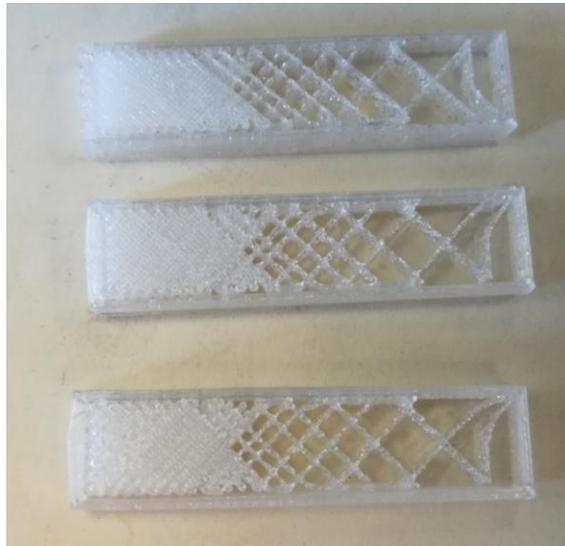


Figura 33. Probeta función logaritmo.

2.6.2. Impresión exponencial

Se realizan impresiones de la probeta mencionada mediante una configuración de entramado exponencial véase Ecuación 3, ajustada en relación al tamaño de la probeta para poder visualizar con claridad la diferencia de entramado.

$$y = (e^{x/10})/10$$

Ecuación 3. Función exponencial.

Mediante la función mencionada se imprimen probetas en un rango de temperatura de 180 a 200, se pueden ver en la Figura 34.

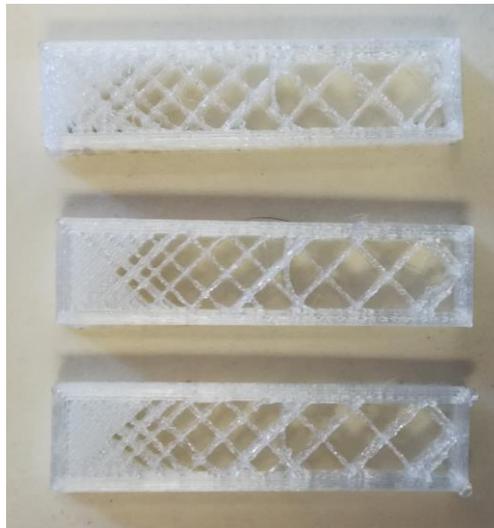


Figura 34. Probeta función exponente.

2.7. Caracterización mecánica

Después de la impresión de probetas mediante ácido polilactico PLA mediante una configuración de entramado lineal, logarítmica y exponencial, que mediante el análisis de literatura se confirmó que no había nada igual se consideró el tamaño de probeta basando en las pruebas a ser aplicadas normas ASTM e ISO de uso común. se les aplica una caracterización mecánica por compresión en diferentes direcciones y además se hace un análisis de flexión Bending en un ambiente con humedad del 32% y a temperatura de 25° C, mediante maquina universal a una velocidad de 5 mm/min y una precarga de 5N.

3. Resultados

Mediante programación de algoritmos de impresión 3D y aplicando pruebas mecánicas de compresión y bending sobre probetas normalizadas impresas con entramados regulares o densificados en un 100%, con entramados tipo exponencial y con entramados tipo logarítmicos pudimos obtener.

3.1. Algoritmo lineal

Al aplicar el algoritmo lineal o convencional propuesto se pudieron obtener patrones de relleno convencionales como se muestra en la Figura 35, es decir patrones donde solo variamos la densidad por el espaciado continuo entre el patrón de relleno, como se puede configurar en los softwares de impresión 3D comerciales como se muestra en la Figura 36.

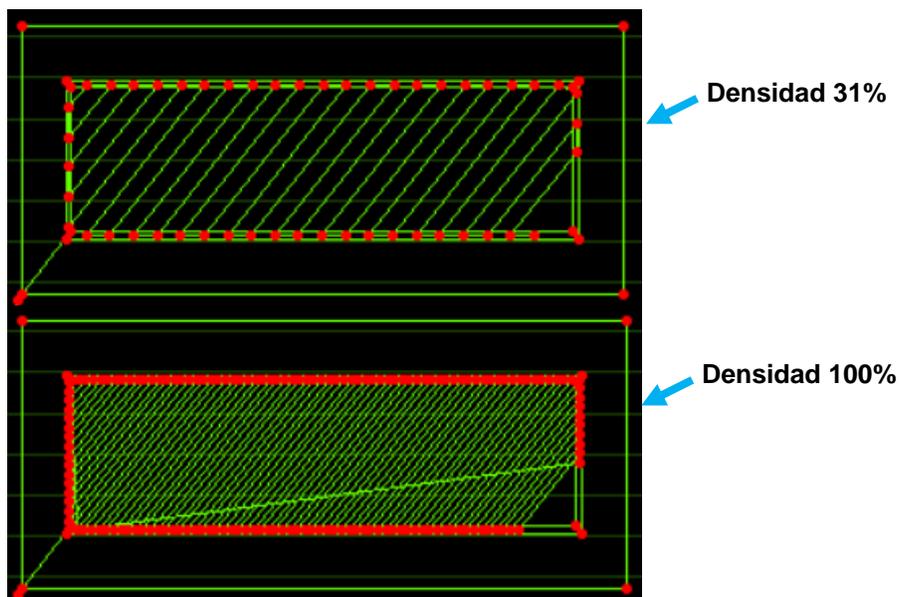


Figura 35. Patrones de relleno lineal o convencional con variación de densidad mediante algoritmo lineal propuesto.

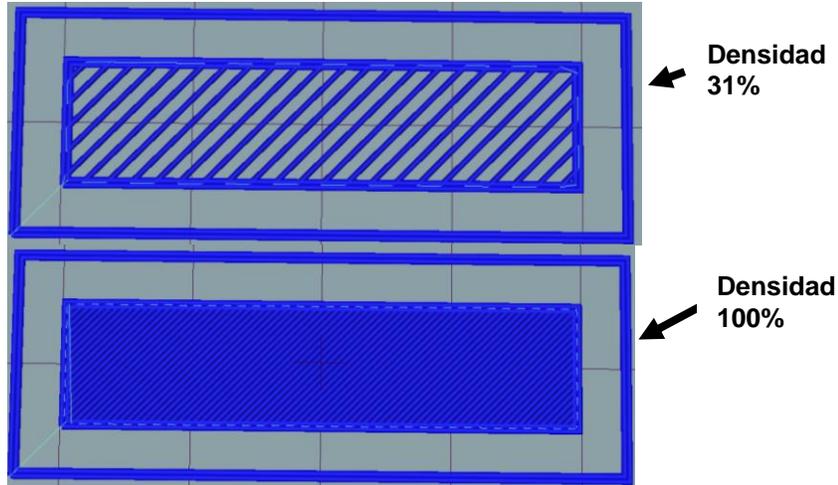


Figura 36. Patrones de relleno lineal o convencional con variación de densidad mediante software de impresión 3D Repetier Host®.

3.2. Algoritmo no lineal

Al aplicar el algoritmo no lineal propuesto se pudo obtener un patrón de relleno personalizado no lineal en cuanto a tres funciones no lineales base logaritmo, exponencial y seno como se muestra en la Figura 37, además de que es posible aumentar o cambiar las funciones no lineales que se aplican al patrón de relleno.

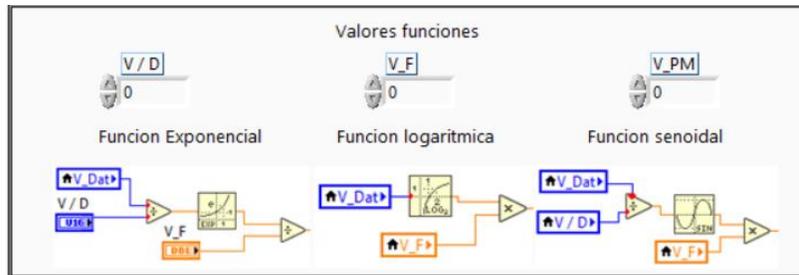


Figura 37. Control de las funciones exponencial, logarítmica y senoidal a aplicar en el algoritmo no lineal de impresión 3D.

Al aplicar las funciones de relleno exponencial, logarítmica y senoidal mediante el algoritmo no lineal propuesto se pudo obtener rellenos que siguen estas funciones como se muestra en la Figura 38, además de que se pueden personalizar.

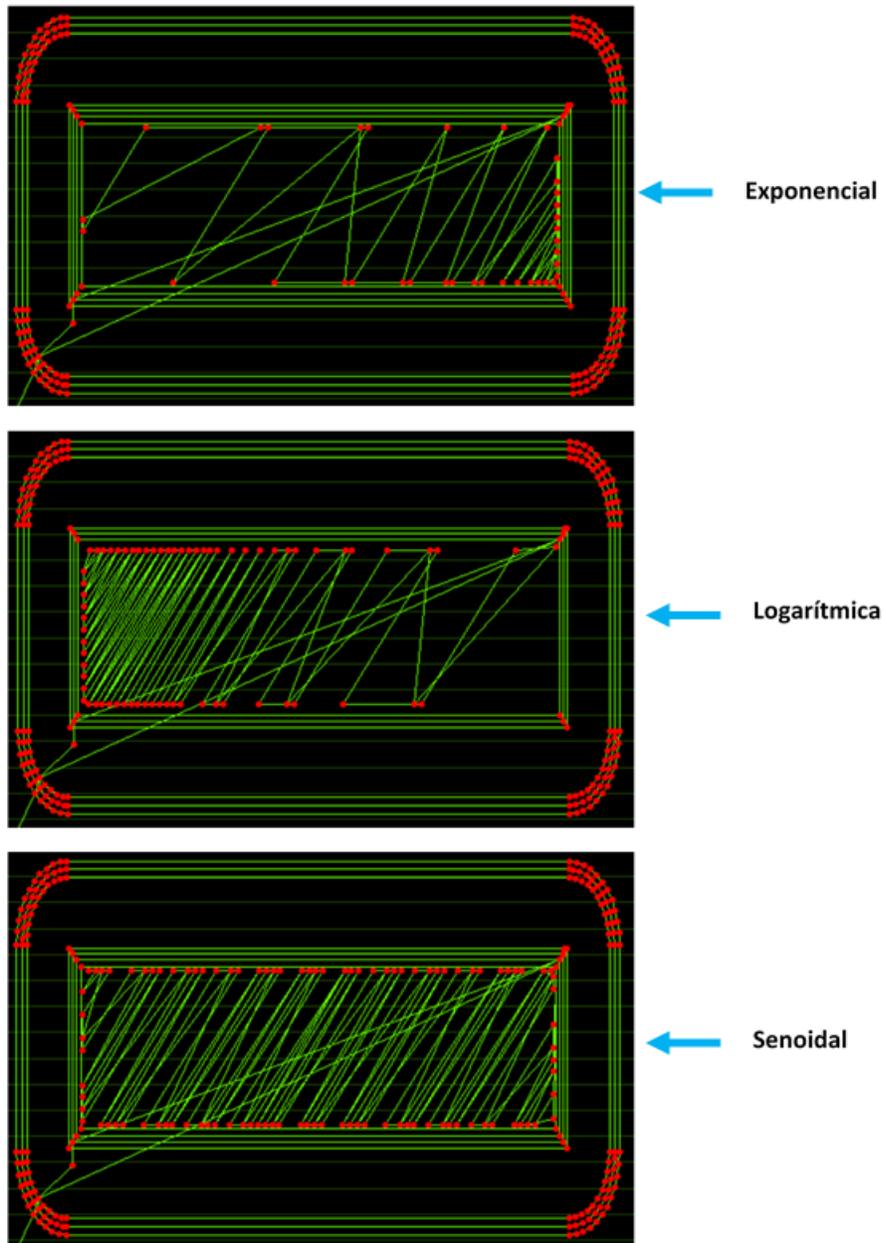


Figura 38. Patrones de relleno Exponencial, Logarítmico y Senoidal mediante algoritmo no lineal propuesto.

3.3. Compresión horizontal

Mediante las pruebas de compresión horizontal sobre probetas de PLA normalizadas se pudo obtener los siguientes resultados:

- **Probeta densidad 100%.** Las probetas con una densificación regular o densificación al 100%, en la prueba de compresión horizontal dieron como resultado características que concuerdan con las características propias del PLA ya que presento una curva de esfuerzo deformación muy lineal con una deformación pequeña a un elevado esfuerzo antes del punto de sedancia, algo típico de un material rígido como lo es el PLA, aunque en esta prueba no se pudo apreciar el punto de sedancia ya que la maquina no pudo aplicar la fuerza suficiente como se muestra en la Figura 39 (REG_A,REG_B).

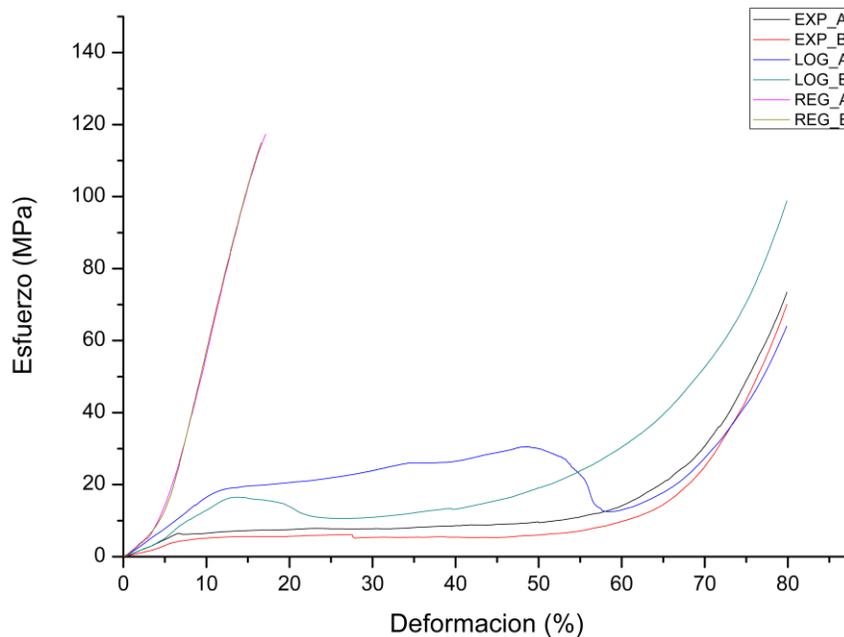


Figura 39. Curvas esfuerzo vs deformación obtenidas mediante pruebas de compresión en eje horizontal en probetas con diferentes entramados de acuerdo al algoritmo utilizado en impresión 3D.

- Probeta función exponencial.** Las probetas densificadas en función de una exponencial, mediante esta técnica mostraron un comportamiento no lineal como se muestra en la Figura 39 (EXP_A, EXP_B) nada parecido al comportamiento típico de un material rígido como es el PLA ya en la curva de esfuerzo deformación presenta en un rango de deformación de 0% a 7% a un esfuerzo promedio de 6 MPa muestra un comportamiento tipo lineal, a partir de este punto muestra un comportamiento no lineal que se asemeja a una función tipo exponencial que se extiende hasta el punto de sedencia como se muestra en la Figura 40 donde se muestra que los resultados de las dos probetas tipo exponencial se ajustan a una función exponencial de primer orden en un 0.99.

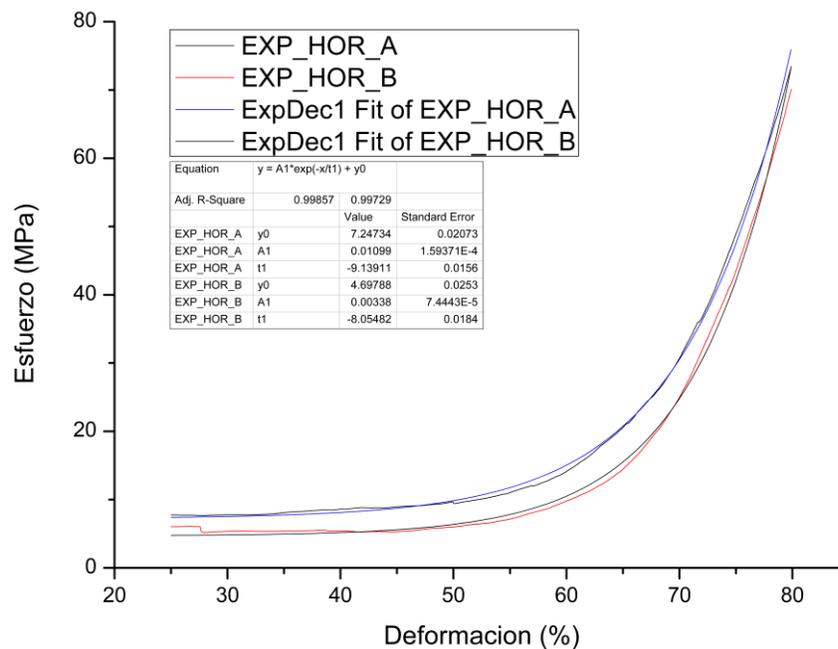


Figura 40. Curvas esfuerzo vs deformación obtenidas mediante pruebas de compresión en eje horizontal, aplicando un ajuste exponencial en probetas exponencial.

- Probeta función logarítmica.** Las probetas con una densificación tipo logarítmica, mediante el análisis de compresión sobre el eje horizontal mostraron un comportamiento no lineal como se muestra en la Figura 39 (LOG_A, LOG_B), ya que en un rango de deformación de 0% a 12% a un esfuerzo promedio de 19 MPa mostraron un comportamiento tipo lineal, a partir de un 12% de deformación las

probetas tuvieron un comportamiento no lineal, aunque solo en una de ellas mostro un comportamiento más uniforme que se asemeja más a una función tipo exponente de primer orden como se muestra en la Figura 41 donde podemos notar que presenta un valor de ajuste del 0.9998.

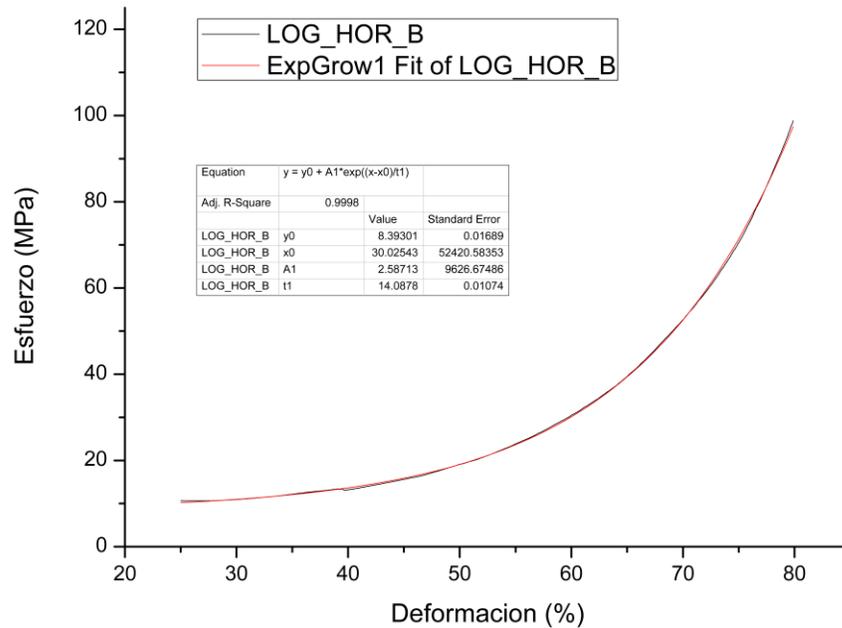


Figura 41. Curvas esfuerzo vs deformación obtenidas mediante pruebas de compresión en eje horizontal, aplicando un ajuste exponencial en probetas tipo logaritmo.

3.4. Compresión vertical

Mediante las pruebas de compresión vertical sobre probetas de PLA normalizadas se pudo obtener los siguientes resultados:

- Probeta densidad 100%.** Las probetas con una densificación regular o densificadas en un 100%, en las pruebas de compresión vertical mostraron un comportamiento típico de un material rígido como lo es el PLA ya que tuvieron un comportamiento muy lineal con una deformación promedio de 0% a 3.2% y soportaron un esfuerzo

promedio de 26 MPa antes del punto de sedencia como se muestra en la Figura 42 (REG_A, REG_B).

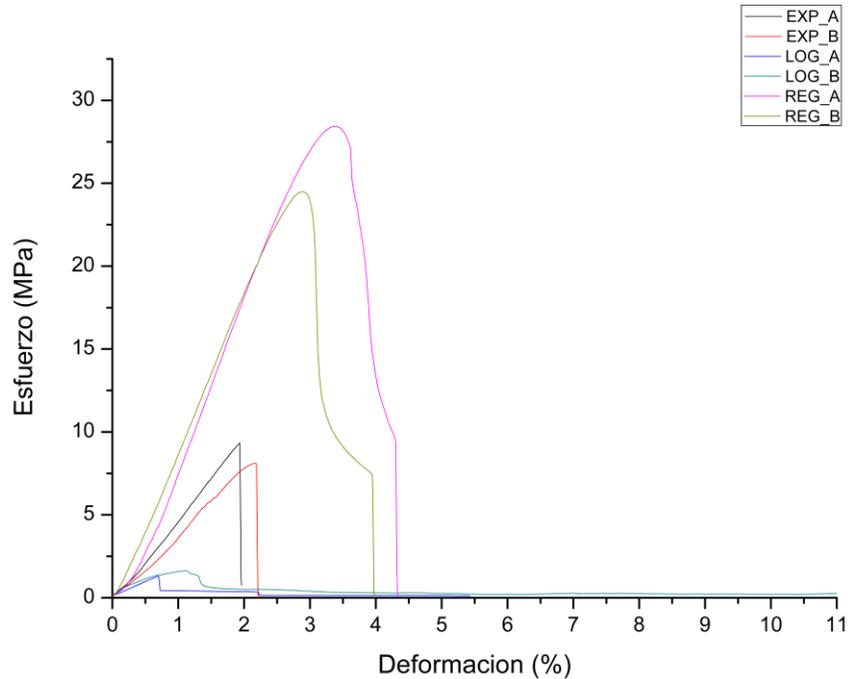


Figura 42. Curvas esfuerzo vs deformación obtenidas mediante pruebas de compresión en eje vertical en probetas con diferentes entramados de acuerdo al algoritmo utilizado en impresión 3D.

- **Probeta función exponencial.** Las probetas densificadas en base a una función tipo exponencial en la prueba de compresión horizontal mostraron un comportamiento típico de un material rígido muy parecido al comportamiento de las probetas densificadas en un 100%, ya que tuvieron un comportamiento lineal con una deformación promedio de 0% a 2% y un esfuerzo máximo promedio de 7 MPa como se muestra en la Figura 42 (EXP_A, EXP_B).
- **Probeta función logarítmica.** Las probetas densificadas en base a una función tipo logarítmica en la prueba de compresión horizontal no mostraron resultados concluyentes ya que, al aplicar fuerza sobre la sección vertical, el entramado de la probeta tiende a desprenderse del borde o marco de la probeta por lo que el esfuerzo solo se aplica sobre este y nos da como resultado un comportamiento lineal como se

muestra en la Figura 42 (LOG_A, LOG_B), donde se muestra una pequeña deformación a un bajo esfuerzo.

3.5. Bending

Mediante las pruebas de Bending sobre probetas de PLA normalizadas se pudo obtener los siguientes resultados:

- **Probeta densidad 100%.** Las probetas densificadas en un 100% mostraron un comportamiento típico de un material rígido como lo es el PLA ya que mostraron un comportamiento lineal, ya que soportaron un promedio de 60 MPa de fuerza aplicada y un promedio de flexión del 3.2% antes del punto de ruptura como se muestra en la Figura 43 (REG_A, REG_B).

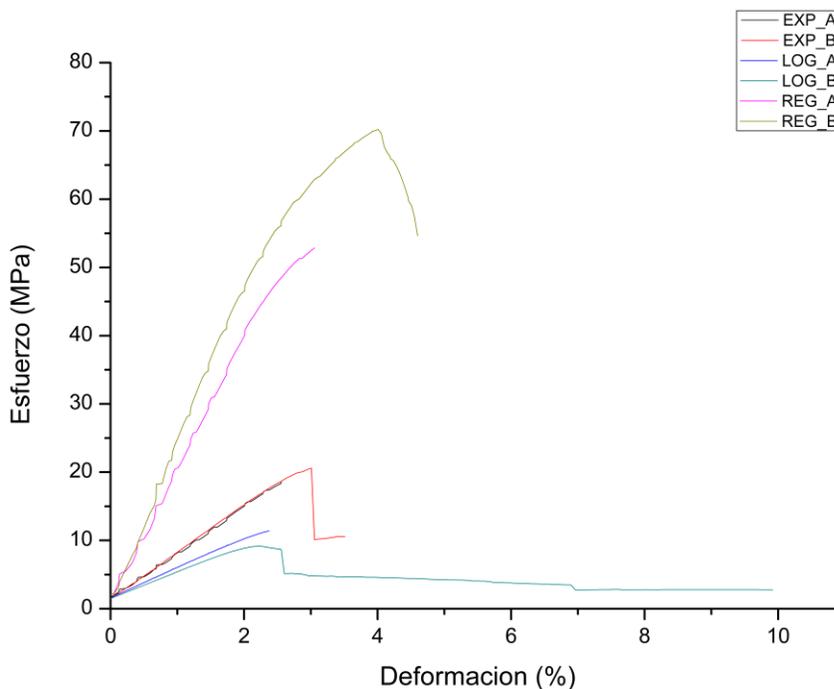


Figura 43. Curvas esfuerzo vs deformación obtenidas mediante pruebas Bending con diferentes entramados de acuerdo al algoritmo utilizado en impresión 3D.

- **Probeta función exponencial.** Las probetas con un entramado tipo exponencial en la prueba Bending mostraron un comportamiento similar a las probetas densificadas en un 100% y a las probetas con un entramado tipo logarítmico como se muestra en la Figura 43 (EXP_A, EXP_B) ya que muestran un comportamiento lineal soportando una fuerza aplicada promedio de 19 MPa y un promedio de flexión del 2.9% antes del punto de ruptura.
- **Probeta función logarítmica.** Las probetas con un entramado tipo logarítmico en la prueba Bending mostraron un comportamiento similar a las probetas densificadas en un 100% y a las probetas con un entramado tipo exponencial como se muestra en la Figura 43 (LOG_A, LOG_B) ya que muestran un comportamiento lineal soportando una fuerza promedio de 9 MPa y un promedio de flexión del 2.5% antes del punto de ruptura, aunque la probeta (LOG_B) después del punto de sedencia mostro un comportamiento de recuperación teniendo un 10% de flexión sin llegar a romperse completamente.

3.6. Comparación

El comportamiento de los algoritmos lineales se asemeja a el comportamiento típico del PLA como se describe en la literatura donde las curvas de esfuerzo deformación nos muestran que el PLA y la impresión 3D convencional da como resultado un comportamiento muy lineal a poca deformación antes del punto de ruptura como se muestra en la Figura 44 (a-PLA, b-PLA, c-PLA) donde el comportamiento del PLA se asemeja al de un material rígido.

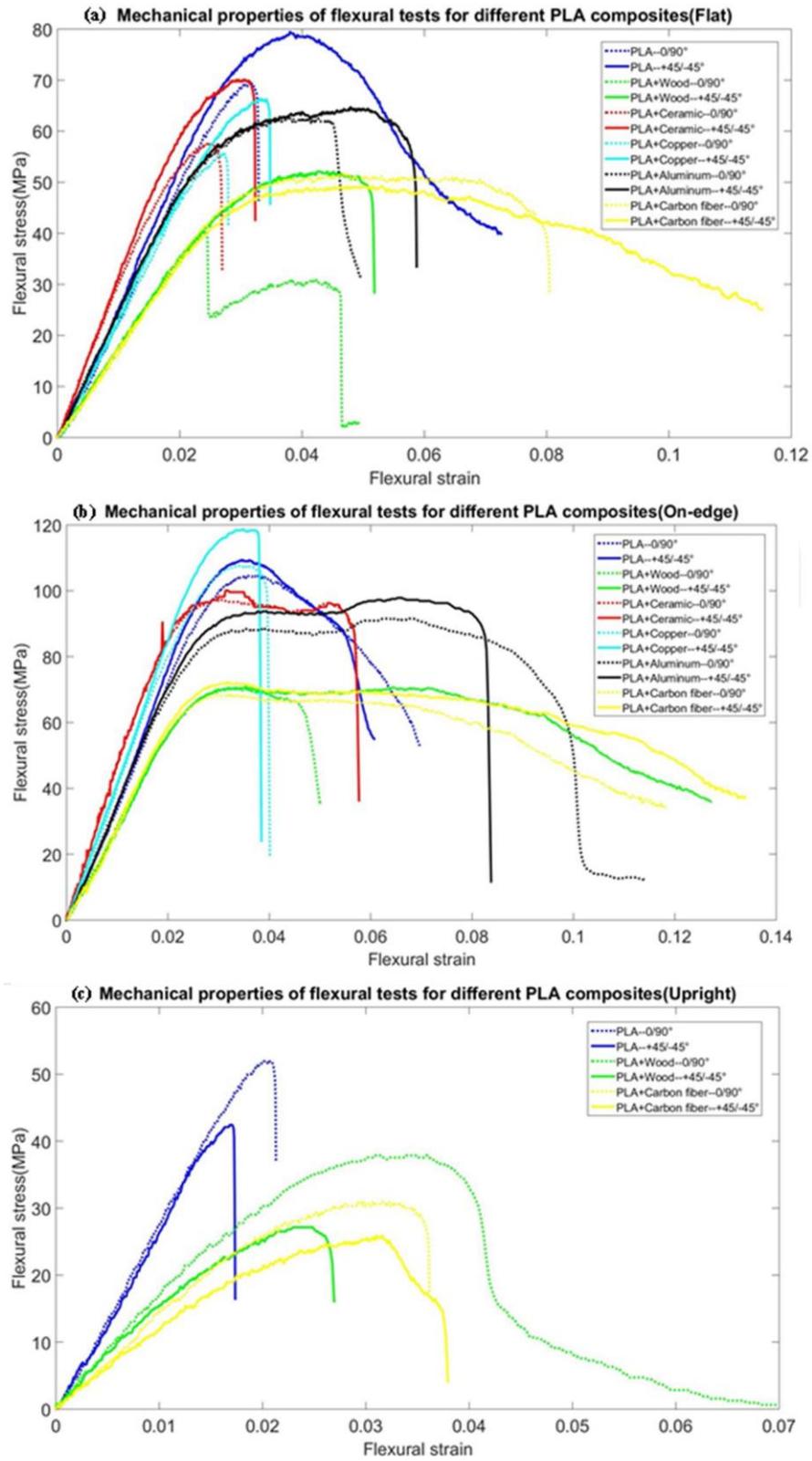


Figura 44. Curvas esfuerzo deformación de diferentes compuestos de PLA (Liu et al. 2019).

El comportamiento de los algoritmos no lineales da resultados que no se asemejan a el PLA que se menciona en la literatura ya que presenta curvas de esfuerzo deformación con un comportamiento no lineal que en algunos casos siguen un patrón de comportamiento similar a la función no lineal programada como se muestra en la Figura 40 y 41. Lo que podría asemejarse al comportamiento no lineal generado por estos algoritmos serian otros materiales no lineales como es el caso del cobre que presenta una ligera variación no lineal en su curva esfuerzo de formación, o podría compararse al comportamiento de algunas estructuras tipo panal como se muestra en la Figura 45, donde se aprecian variaciones no lineales en el comportamiento de la estructura, además de que podemos comparar los resultados con la literatura véase Tabla 6.

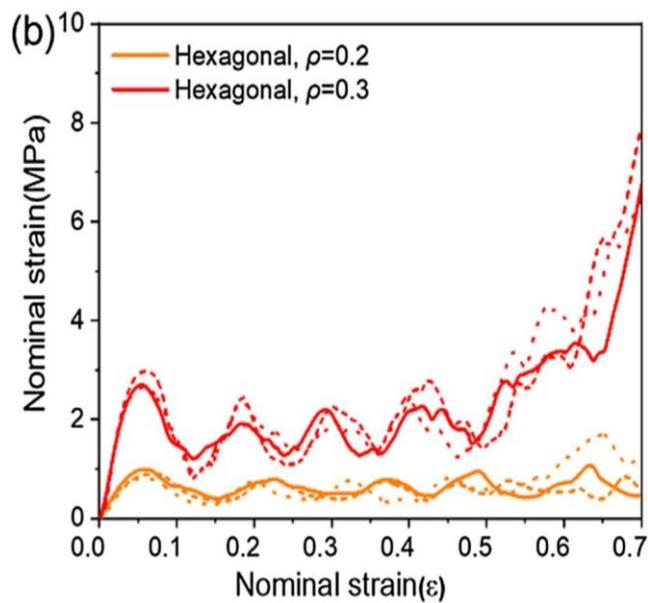


Figura 45. Curvas esfuerzo deformación de estructuras tipo panal tipo hexagonal (San et al. 2019).

Material	Técnica	Patrón de relleno	Orientación	Deposición de capa	Resistencia a la flexión(MPA)	Resistencia a la compresión (MPa)	Deformación %	Respuesta
PLA (Liu et al. 2019)	FDM 3D	Lineal	plano	90°	69.7		3	Lineal
				45°	79.5		4	Lineal
		Lineal	Borde	90°	104.5		3.5	Lineal
				45°	109.5		3.5	Lineal
		Lineal	Vertical	90°	51.9		2	Lineal
45°	42.4				1.5	Lineal		
PLA + Madera (Liu et al. 2019)	FDM 3D	Lineal	plano	90°	40.4		2	Lineal
				45°	52.1		5	Lineal
		Lineal	Borde	90°	70.4		4	Lineal
				45°	71		10	Lineal
		Lineal	Vertical	90°	37.9		3.5	Lineal
45°	27.1				2.5	Lineal		
PLA + Aluminio (Liu et al. 2019)	FDM 3D	Lineal	plano	90°	62.8		5	Lineal
				45°	64.7		5	Lineal
		Lineal	Borde	90°	91.5		8	Lineal
				45°	97.8		8	Lineal
		Lineal	Vertical	90°	-		-	
45°	-				-			
PLA / KBF (San et al. 2019)	FDM 3D	panal circular	plano	0°		2.34	-	Variaciones entre deformación y esfuerzo
PLA-PCL20 / KBF (San et al. 2019)	FDM 3D		Plano	0°		2.46	-	
PLA-PCL30 / KBF (San et al. 2019)	FDM 3D	panal circular	Plano	0°		2.55	-	
PLA / KBF (San et al. 2019)	FDM 3D	Panal Hexagonal	Plano	0°		6	-	Variaciones entre deformación y esfuerzo
PLA / KBF	FDM 3D	Panal Re-entrant	Plano	0°		8	-	
PLA	FDM 3D	Lineal	Plano	45°		60	3.2	Lineal
		Exponencial	Plano	45°		19	2.9	Lineal
		Logarítmica	Plano	45°		9	2.5	Lineal
PLA	FDM	Lineal	Horizontal	45°	120		10	Lineal
		Exponencial	Horizontal	45°	6		7	No lineal
		Logarítmica	Horizontal	45°	19		12	No lineal
PLA	FDM	Lineal	vertical	45°	26		3.2	Lineal
		Exponencial	vertical	45°	7		2	Lineal
		Logarítmica	vertical	45°	-		-	No concluyente

Tabla 6. Respuesta mecánica del PLA y compuestos a base de PLA.

4. Conclusiones

El dispositivo de impresión 3d tiene la capacidad de imprimir en un rango de temperatura de 0 a 250 °c, en un área cartesiana de 22.5 cm en el eje X, 14 cm en el eje Y, y 30 cm en el eje Z, además de que tiene la capacidad de imprimir biomaterial PLA en un formato tipo filamento de un diámetro de 1.75 mm, con la capacidad de adaptar filamento de 3 mm.

El dispositivo de impresión 3d tiene la capacidad de imprimir objetos y diversas formas geométricas de forma similar a dispositivos comerciales utilizando software de procesamiento 3D libre.

El dispositivo cuenta con la capacidad de imprimir objetos con un patrón de relleno personalizable en función de una exponencial, logarítmica y además cuenta con la posibilidad de expansión en cuanto a funciones de entramado.

La interfaz de control permite variar los parámetros de impresión tanto convencionales como parámetros propuestos de impresión no lineal

Las probetas impresas con entramado personalizable en función exponencial y logarítmica dieron resultados correspondientes a un polímero con un módulo elástico no lineal además de que presentan variaciones de anisotropía diferentes al PLA impreso de manera convencional con una densificación del 100%.

Con este tipo de manufactura adictiva no lineal es posible fabricar estructuras poliméricas con anisotropía estructural intrínseca algo similar a las estructuras tipo panal o la respuesta mecánica que se esperaría en andamios para meniscos (Szojka et al.2017).

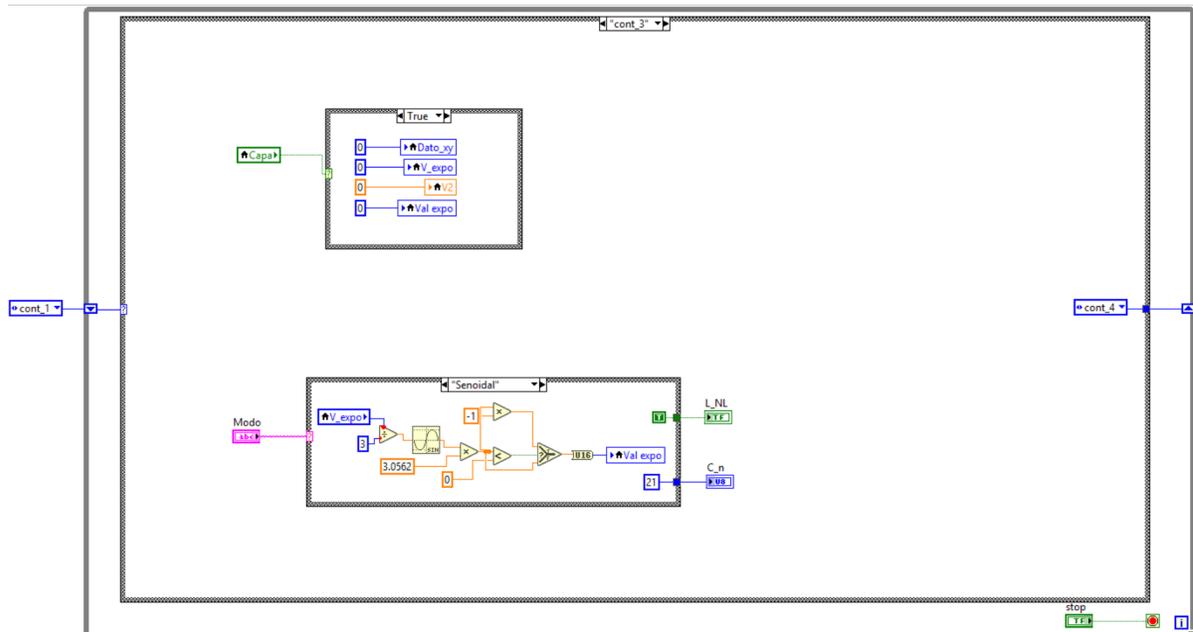
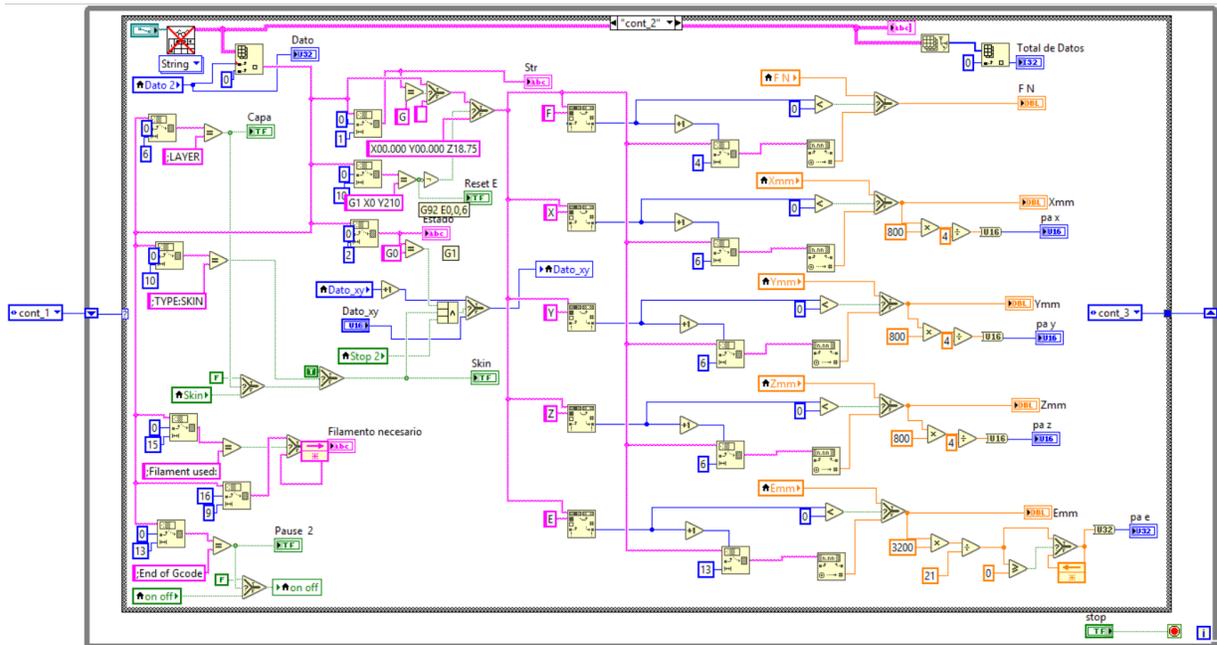
Referencias Bibliográficas

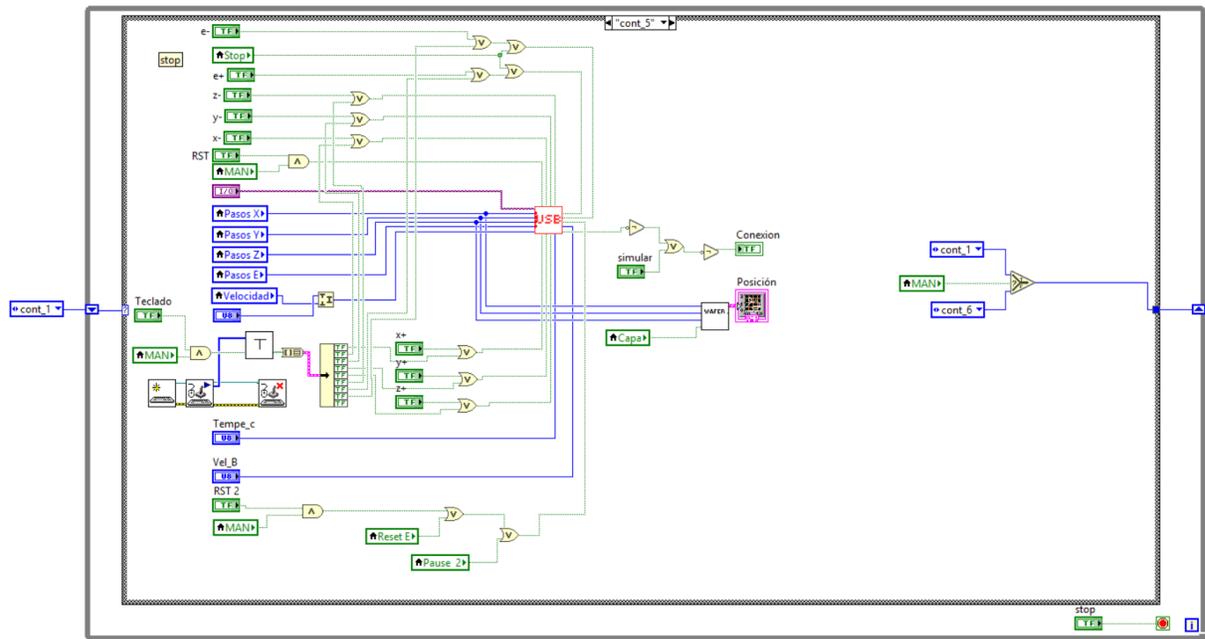
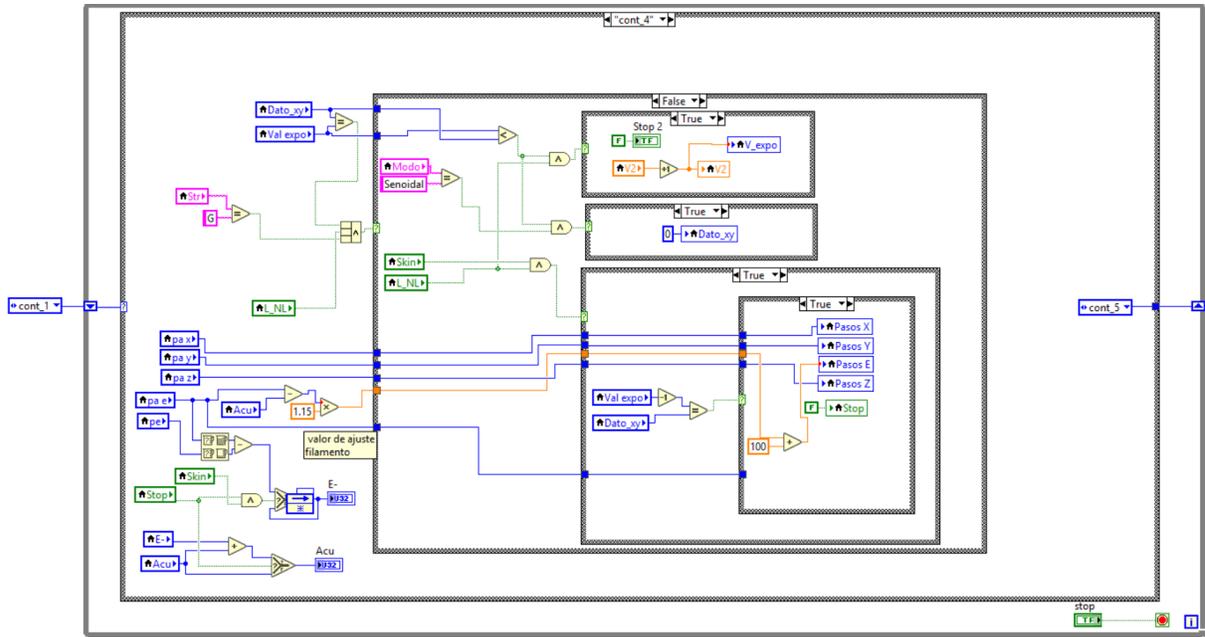
- Asadi Eydivand, M., Solati Hashjin, M., Fathi, A., Padashi, M., & Abu Osman, N. (2016). Optimal design of a 3D-printed scaffold using intelligent evolutionary algorithms. *Applied Soft Computing*, 36- 47.
- COTEC. (2011). *Fabricación Aditiva*. Madrid: Gráficas Arias Montano.
- Farzadi, A., Waran, V., Solati Hashjin, M., Abdul Rahman, Z., Asadi, M., & Abu Osman, N. (2015). Effect of layer printing delay on mechanical properties and dimensional accuracy of 3D printed porous prototypes in bone tissue engineering. *CERAMICS INTERNATIONAL*, 8320- 8330.
- Fergal, J., & O'Brien. (2011). Biomaterials & scaffolds for tissue engineering. *materialstoday*, 88-95.
- FRED W. BILLMEYER, J. (1984). *TEXTBOOK OF POLYMER SCIENCE*. New York: Wiley Interscience.
- Hermida, É. (2011). *Polímeros*. Buenos aires: inet.
- Herryman Munilla, M., & Blanco Carracedo, G. (2005). Ácido láctico y poliláctico: Situación actual y tendencias. *ICIDCA*, 49-59.
- J. M. Gere and B. J. Goodno, *Mechanics of materials*. Stamford. CT, usa.: Cengage Learning. (2009).
- Kenneth I. (2002). Bresenham's Algorithm. Visualization and Graphics Research Group. Department of Computer Science. University of California.
- Kuhn, H., & Medlin, D. (2000). *Mechanical Testing and Evaluation*. ASM International.
- Lee, J. Y., & Chee Kai Chua, J. A. (2017). Fundamentals and applications of 3d printing for novel material. *Applied Materials Today*, 120-133.
- Liu, Z., Leid, Q., & Xinga, S. (2019). Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Journal of Materials Research and Technology*, 11.
- Min Seok, K., & Sung Chong, C. (2006). Integrated design methodology of ball-screw driven servomechanisms with discrete controllers. Part I: Modelling and performance analysis. *Mechatronics*, 491-502.
- O'Brien Fergal J. (2011). Biomaterials & scaffolds for tissue engineering. *Materials Today*, 88-95.

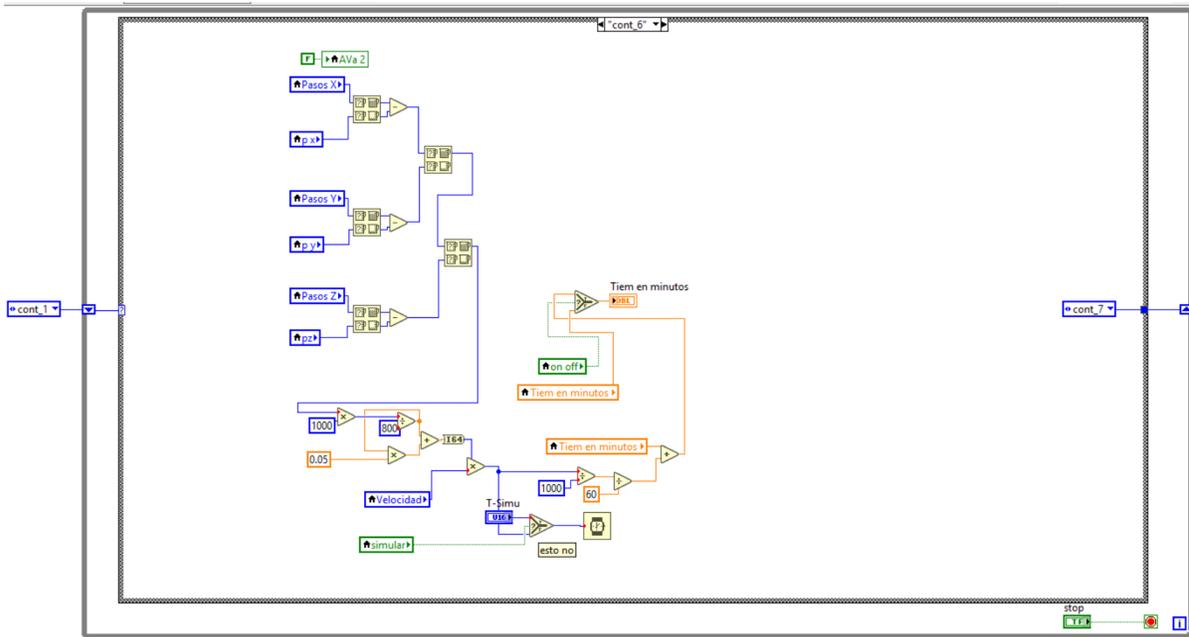
- Olguin, R. (13 de diciembre de 2016). INSTITUTO TECNOLOGICO UNIVERSITARIO. Obtenido de Características de las impresoras 3D: http://itu.uncuyo.edu.ar/cache/infografia-3d-itu-01_900_750.jpg
- Ortiz Chimbo, K. M., Luna Aveiga, H., Medina Moreira, J., & Soledispa Tumbaco, R. L. (2016). LOS BENEFICIOS DE LAS IMPRESORAS 3D COMO HERRAMIENTA DE INNOVACION EN LA MEDICINA. REVISTA CARIBEÑA DE CIENCIAS SOCIALES, 1-15.
- Plastics Technology México . (1 de marzo de 2016). *Plastics Technology México* . Obtenido de Conceptos básicos de manufactura aditiva: <https://www.pt-mexico.com/art%c3%adculos/conceptos-bsicos-de-manufactura-aditiva>
- Rodríguez, F. D. (1 de Agosto de 2008). *Universidad Nacional Autonoma de México*. Obtenido de PROGRAMACIÓN AUTOMÁTICA DE MAQUINAS: https://unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec
- San, L., Han, S., Pen, X., Jian, X., & Wang, J. (2019). Development of 3D-printed basalt fiber reinforced thermoplastic honeycombs with enhanced compressive mechanical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125: 105518.
- Serna C, L., Rodríguez de S, A., & Albán A, F. (2011). Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones. *Ingeniería y competitividad*, 16-26.
- Song, y., Li, Y., Song, W., Yee, K., Lee, K.-Y., & Tagarielli, V.-L. (2017). Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D printed PLA. *Materials and Design*, 154-164.
- Szojka, A., Lalh, K., Andrews, S., Jomha, N., Osswald, M., & Adesida, A. (2017). Biomimetic 3D printed scaffolds for meniscus tissue engineering. *Bioprinting*, 8: 1-7.
- Torres Barahona, E. A., León medina, J. X., & Torres Díaz, E. (2012). SISTEMA DE POSICIONAMIENTO APLICADO A LA TÉCNICA DE IMPRESIÓN 3D. *investigación desarrollo innovación*, 25-32.
- Yedige, T., Geok Soon, H., & Wen Feng, L. (2018). Nozzle condition monitoring in 3D printing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 45-55.
- Ying, J., Lu, L., Tian, L., Yan, X., & Chen, B. (2017). Anisotropic porous structure modeling for 3Dprinted odjects. *Computers & Graphics*, 1-8.
- Yuval, R., Moran, H. Z., Abraham, J., Domb, & Nyska, A. (2016). Biocompatibility and safety ofPLA and its copolymers. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 153-162.

Anexos

Anexo 1: Programa en lenguaje grafico LabVIEW







Anexo 2: Programa microcontrolador maestro en lenguaje C CCS C compilador

```

1  #include <18F4550.h>
2  #fuses HSPLL,NOBODT,NOPROTECT,NOLVP,NODEBUG,USBDIV,PLLS,CPUDIV1,VREGEN
3  //configuracion de crystal de 20MHz para operar a 48MHz
4  #use delay(clock=48000000)
5  #DEFINE USB_HID_DEVICE TRUE
6  #define USB_EP1_TX_ENABLE USB_ENABLE_INTERRUPT //turn on EP1 for IN bulk/interrupt transfers
7  #define USB_EP1_TX_SIZE 14
8  #define USB_EP1_RX_ENABLE USB_ENABLE_INTERRUPT //turn on EP1 for OUT bulk/interrupt transfers
9  #define USB_EP1_RX_SIZE 14
10 #include <pic18_usb.h> //Funciones de bajo nivel(hardware) para la serie PIC 18Fxx5k que serviran en usb.c
11 #include <usb_desc_hid.h> //Aqui es donde van las descripciones de este dispositivo (como lo reconocera windows)
12 #include <usb.c> //libreria para el manejo del usb
13
14
15 /* Configuración I2C modo Master por hardware e identificación de los pines */
16 #use i2c(Master,fast,sda=PIN_B0,scl=PIN_B1)
17
18 /* Configuración de los puertos */
19 #use fast_io(a)
20 #use fast_io(B)
21 #use fast_io(C)
22 #use fast_io(e)
23 #include <stdlib.h> //Libreria necesaria para función rand()
24
25
26 /***** Variables *****/
27 int8 Salida[14];
28 int8 Entrada[14];
29 int16 pasos_x,pasos_y,pasos_z,pasos_xa,pasos_ya,pasos_za,v_d,temp_c,temp_ca,tem_l;
30 int32 pasos_e,pasos_ea;
31 int8 reset,rst,velocidad,velocida_d;
32 int8 c_m,c_ma,velocidad_b,v_b;
33
34
35
36 /*****
37 /***** FUNCIÓN ESCRITURA EN PICS ESCLAVOS *****/
38 /** Guarda un dato (número aleatorio) en la posición de memoria indicada y en el
39 PIC correspondiente a la dirección I2C proporcionada **/
40

```

```

40
41 void Envio_I2C(direccion, posicion, dato){
42
43     i2c_start();           // Comienzo comunicación
44     i2c_write(direccion); // Dirección del esclavo en el bus I2C
45     i2c_write(posicion);  // Posición donde se guardara el dato transmitido
46     i2c_write(dato);      // Dato a transmitir
47     i2c_stop();           // Fin comunicación
48     delay_us(v_d);
49 }
50
51 //*****
52 //***** FUNCIÓN PRINCIPAL *****
53 //*****
54
55 void main()
56 {
57
58     byte dato=0;           //Contendrá la información a enviar o recibir
59     byte direccion=0;      //Contendrá la dirección del esclavo en el bus I2C
60     byte posicion=0;       //Contendrá la posición en el buffer de memoria del esclavo donde se almacenará o de donde se recuperará el dato
61     setup_adc_ports(NO_ANALOGS); //puerto a y b como digital
62     set_tris_d(0x00);     //puerto d com salidas
63     set_tris_a(0xff);
64     set_tris_e(0xff);
65     pasos_x=0; pasos_y=0; pasos_z=0; pasos_e=0;
66     pasos_xa=0; pasos_ya=0; pasos_za=0; pasos_ea=0; rst=0;
67     velocidad=200; reset=0;
68
69     usb_init();
70     usb_task(); //Monitorea el estado de la conexión conectándose y desconectándose automáticamente
71     usb_wait_for_enumeration(); //espera infinitamente hasta que el dispositivo fue enumerado
72     delay_ms(1000);
73
74     for (posicion=0;posicion<0x10;posicion++) // ciclo de reset de bufer
75     {entrada[posicion] = 0x00;salida[posicion] = 0x00;}
76
77     while (true)
78     {
79         usb_task();

```

```

78     {
79         usb_task();
80         if (usb_enumerated())
81         {
82             salida[0]=input(pin_a0);
83             salida[1]=input(pin_a1);
84             salida[2]=input(pin_a2);
85             salida[3]=input(pin_a3);
86             salida[4]=input(pin_a4);
87             salida[5]=input(pin_a5);
88             salida[6]=input(pin_e0);
89             salida[7]=tem_l;
90             salida[12]=120;
91             usb_put_packet(1, Salida,13 , USB_DTS_TOGGLE);
92
93             if (usb_kbhit(1)) { usb_get_packet(1, Entrada, 15);}
94
95             pasos_x=(Entrada[0] * 256 + Entrada[1];
96             pasos_y=(Entrada[2] * 256 + Entrada[3];
97             pasos_z=(Entrada[4] * 256 + Entrada[5];
98             pasos_e=(Entrada[6] * 256 + ((Entrada[7] * 256) + Entrada[8]));
99             velocidad = Entrada[9];
100            reset= Entrada[10];
101            c_m= Entrada[11];
102            temp_c=Entrada[12];
103            velocidad_b= Entrada[13];
104
105
106        }
107
108
109        if (velocidad!=velocida_d) { v_d=10;//70
110        Direccion= 0x32;/***/ posicion= 0x05;/***/ dato= velocidad & 15;
111        Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
112
113        Direccion= 0x3C;/***/ posicion= 0x05;/***/ dato= velocidad & 15;
114        Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
115
116        Direccion= 0x46;/***/ posicion= 0x05;/***/ dato= velocidad & 15;
117        Envio_I2C(direccion, posicion, dato);

```

```

115
116     Direccion= 0x46;/***/ posicion= 0x05;/***/ dato= velocidad & 15;
117     Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
118
119     Direccion= 0x50;/***/ posicion= 0x05;/***/ dato= (velocidad & 240)/16;
120     Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
121     velocida_d=velocidad; }
122
123 if (pasos_x!=pasos_xa) { v_d=10; /****** Transmicion en x
124 /****** Datos esclavo x *****/
125 Direccion= 0x32;/***/ posicion= 0x03;/***/ dato= pasos_x;
126 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
127
128 Direccion= 0x32;/***/ posicion= 0x04;/***/ dato= pasos_x>>8;
129 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
130 pasos_xa=pasos_x; }
131
132 if (pasos_y!=pasos_ya) { v_d=10; /****** Transmicion en y
133 /****** Datos esclavo x *****/
134 Direccion= 0x3C;/***/ posicion= 0x03;/***/ dato= pasos_y;
135 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
136
137 Direccion= 0x3C;/***/ posicion= 0x04;/***/ dato= pasos_y>>8;
138 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
139 pasos_ya=pasos_y; }
140
141 if (pasos_z!=pasos_za) { v_d=10; /****** Transmicion en z
142 /****** Datos esclavo x *****/
143 Direccion= 0x46;/***/ posicion= 0x03;/***/ dato= pasos_z;
144 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
145
146 Direccion= 0x46;/***/ posicion= 0x04;/***/ dato= pasos_z>>8;
147 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
148 pasos_za=pasos_z; }
149
150 if (pasos_e!=pasos_ea){ v_d=10; /****** Transmicion en e
151 /****** Datos esclavo E *****/
152 Direccion= 0x50;/***/ posicion= 0x03;/***/ dato=pasos_e;
153 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
154

```

```

153     Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
154
155     Direccion= 0x50;/***/ posicion= 0x04;/***/ dato=pasos_e >>8;
156     Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
157     }
158
159 if (reset!=rst){ v_d=10; /****** Transmicion de resets
160 /****** resets *****/
161 Direccion= 0x32;/***/ posicion= 0x06;/***/ dato=reset & 1;
162 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
163
164 Direccion= 0x3C;/***/ posicion= 0x06;/***/ dato=reset & 1;
165 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
166
167 Direccion= 0x46;/***/ posicion= 0x06;/***/ dato=reset & 1;
168 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
169
170 Direccion= 0x50;/***/ posicion= 0x06;/***/ dato=(reset & 2)-1;
171 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
172 rst=reset; }
173
174 if (c_m!=c_ma){ v_d=10; /****** modo manual
175 /****** resets *****/
176 Direccion= 0x32;/***/ posicion= 0x07;/***/ dato=(c_m & 3);
177 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
178
179 Direccion= 0x3C;/***/ posicion= 0x07;/***/ dato=(c_m & 12);
180 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
181
182 Direccion= 0x46;/***/ posicion= 0x07;/***/ dato=(c_m & 48);
183 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
184
185 Direccion= 0x50;/***/ posicion= 0x07;/***/ dato=(c_m & 192);
186 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
187 c_ma=c_m; }
188
189 if (temp_c!=temp_ca){ v_d=10;
190 //esclavo temperatura
191 Direccion= 0x5A;/***/ posicion= 0x03;/***/ dato=temp_c;
192

```

```

190 //esclavo temperatura
191 Direccion= 0x5A;/**/ posicion= 0x03;/**/ dato=temp_c;
192 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
193 temp_ca=temp_c;}
194
195 if (pasos_e!=pasos_ea){ v_d=10; /****** Transmision en e
196 /****** Datos esclavo E *****/
197 Direccion= 0x50;/**/ posicion= 0x08;/**/ dato=pasos_e >>16;
198 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
199 pasos_ea=pasos_e; }
200
201 if (velocidad_b!=v_b){ v_d=10;
202 //esclavo temperatura
203 Direccion= 0x5A;/**/ posicion= 0x04;/**/ dato=velocidad_b;
204 Envio_I2C(direccion, posicion, dato);
205 v_b=velocidad_b;}
206
207 delay_ms(1);
208 }
209 }
210

```

Anexo 3: Programa microcontrolador esclavo eje X en lenguaje C CCS C compilador

```

1 #include <18F2550.h>
2 #fuses HSPLL,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP,NODEBUG,USBDEV,PLL5,CPUDIV1,NOVREGEN //configuracion de crystal de 20MHz para operar a 48MHz
3 #use delay(clock=48000000)
4
5 #Byte PortA = 0xF80 // Dirección del puerto A para la familia 18Fxx5k.
6
7 /****** Configuración de la comunicación I2c *****/
8 #use i2c(slave, fast, sda=PIN_B0, scl=PIN_B1, address=0x32)
9
10
11 /****** Variables globales *****/
12 /******
13
14 byte fstate; //Guardara el estado del bus I2C
15 byte posicion, buffer[0x10],bufferw[0x05]; //Buffer de memoria
16 short EnvioMaster; //Indicación de fin del byte enviado por el master
17 short SolicitudMaster=0; //Indicación de fin de la entrega del byte solicitado por el master
18 int16 datos_x,datos_x_a,velocidad,i; //Datos de posicion
19 int8 dah,dal,reset,x_p;
20
21
22
23 /******
24 /****** FUNCIÓN INTERRUPTIÓN POR RECEPCION I2C *****/
25 /*** Saltará a esta función cada vez que se detecte actividad en el bus I2C **/
26
27 #INT_SSP
28 void ssp_interrupt (){
29
30 int incoming; //Variable donde se recibe el byte que manda el maestro
31
32 fstate = i2c_isr_state(); //Lectura del estado del bus I2c la interrupción
33
34 /* Solicitud de lectura del esclavo por el master */
35 if(fstate == 0x80) {
36 //Manda al maestro la información contenida en la posición de memoria que le ha solicitado
37 i2c_write (bufferw[posicion]);
38 SolicitudMaster=1; //Fin de solicitud del master
39 }

```

```

39 }
40 /* Sino está solicitando lectura es que está enviando algo */
41 else { //Sino es que hay dato en el bus I2C...
42     incoming = i2c_read(); //... lo lee
43
44     if (fState == 1) { //Información recibida corresponde a la posición
45         posicion = incoming; //Se guarda posición
46     }
47     else if (fState == 2) { //Información recibida corresponde al dato
48         buffer[posicion] = incoming; //Se guarda dato
49         EnvioMaster=1; //Fin del envío del master
50     }
51 }
52 }
53 }
54
55
56 /***** Funcion de puesta a cero *****/
57 void retardo();
58
59 /***** FUNCIÓN PRINCIPAL *****/
60
61 void main (){
62
63     setup_ADC_ports(NO_ANALOGS); //puerto a y b como digital
64     enable_interrupts(INT_SSP);
65     setup_adc(adc_off);
66     enable_interrupts(GLOBAL);
67     Setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_2);
68     Setup_vref(FALSE);
69
70     Set_Tris_A(0b11111111); // Puerto A todo entradas
71     set_tris_b(0x03); //puerto B como entrada y salida
72     set_tris_c(0x00); //puerto C com salidas
73     fState = 0;
74
75     for (posicion=0;posicion<0x10;posicion++) // ciclo de reset de bufer
76     buffer[posicion] = 0x00;bufferw[posicion] = 0x00;
77
78

```

```

79 /***** Reset de variables *****/
80 datos_x=0;
81 datos_x_a=0;
82 velocidad=200;
83 reset=0;
84 x_p=0;
85 output_low(pin_b7); // DIR
86 output_low(pin_b6); // STEP
87 output_high(pin_b5); // RESET
88 output_high(pin_b4); // SLEEP
89 output_low(pin_c4); // ENABLE
90
91 output_low(pin_b3); //M2
92 output_high(pin_b2); //M1
93 output_high(pin_c5); //M0
94
95
96 while(true)
97 {
98     /* Si el master ha enviado algo */
99     if (EnvioMaster==1) // Rececion de datos I2C
100     {
101         dah-buffer[4]; // Rececion de dato alto
102         dal-buffer[3]; // Rececion de dato bajo
103         velocidad=buffer[5]; // Rececion de velocidad
104         reset=buffer[6]; // Rececion de condicion cero
105         x_p=buffer[7];
106         datos_x=(dah * 256) + dal; // Union de bits
107         EnvioMaster=0; //Preparado para señalar nuevo solicitud del master
108     }
109
110     if (x_p==1){output_high(pin_b6); output_high(pin_b7); datos_x_a=0;output_low(pin_c4);}
111     else if (x_p==2){output_high(pin_b6); output_low(pin_b7); datos_x_a=0;output_low(pin_c4);}
112     else {
113         /// x control
114         if (datos_x > datos_x_a){ output_high(pin_b6); output_high(pin_b7); datos_x_a ++;output_low(pin_c4);} // Control x a la derecha
115         else if (datos_x < datos_x_a){ output_high(pin_b6); output_low(pin_b7); datos_x_a --;output_low(pin_c4);} // Control x a la izquierda
116         else{output_high(pin_c4);}
117

```

```

117     }
118     retardo ();
119     output_low(pin_b6); // Pulso en bajo
120     retardo ();
121
122     if (reset==1){datos_x=0;datos_x_a=0;} // Cndicion de reinicio
123
124 }
125 }
126
127
128 void retardo ()
129 {
130     i=0;
131     while(i<velocidad)
132     {
133         delay_us(625);
134         i=i+1;
135     }
136 }

```

Anexo 4: Programa microcontrolador esclavo eje Y en lenguaje C CCS C compilador

```

1  #include <18F2550.h>
2  #fuses HSPLL,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP,NODEBUG,USBDIV,PLL5,CPUDIV1,NOVREGEN //configuracion de crystal de 20MHz para operar a 48MHz
3  #use delay(clock=48000000)
4
5  #Byte PortA = 0xF80 // Dirección del puerto A para la familia 18Fxx5k.
6
7  /***** Configuración de la comunicación I2c *****/
8  #use i2c(slave, fast, sda=PIN_B0, scl=PIN_B1, address=0x3C)
9
10
11 /***** Variables globales *****/
12 /*****
13
14 byte fstate; //Guardara el estado del bus I2C
15 byte posicion, buffer[0x10],bufferw[0x05]; //Buffer de memoria
16 short EnvioMaster; //Indicación de fin del byte enviado por el master
17 short SolicitudMaster=0; //Indicación de fin de la entrega del byte solicitado por el master
18 int16 datos_y,datos_y_a,i,velocidad;
19 int8 dah,dal,reset,y_p;
20
21
22
23 /*****
24 /***** FUNCIÓN INTERRUPTIÓN POR RECEPCION I2C *****/
25 /** Salta a esta función cada vez que se detecte actividad en el bus I2C **/
26
27 #INT_SSP
28 void ssp_interrupt (){
29
30     int incoming; //Variable donde se recibe el byte que manda el maestro
31
32     fstate = i2c_isr_state(); //Lectura del estado del bus I2c la interrupción
33
34     /* Solicitud de lectura del esclavo por el master */
35     if(fstate == 0x80) {
36         //Manda al maestro la información contenida en la posición de memoria que le ha solicitado
37         i2c_write (bufferw[posicion]);
38         SolicitudMaster=1; //Fin de solicitud del master
39     }
40     /* Fin de solicitud de lectura por un esclavo enviado al master */

```

```

40  /* Si no está solicitando lectura es que está enviando algo */
41  else {                                     //Si no es que hay dato en el bus I2C...
42      incoming = i2c_read();                 //... lo lee
43
44
45  }
46  if (fState == 1) {                         //Información recibida corresponde a la posición
47      posicion = incoming;                   //Se guarda posición
48  }
49  else if (fState == 2) {                    //Información recibida corresponde al dato
50      buffer[posicion] = incoming;          //Se guarda dato
51      EnvioMaster=1;                         //Fin del envío del master
52  }
53  }
54
55
56  /***** Funcion de puesta a cero *****/
57  void retardo();
58
59  /***** FUNCIÓN PRINCIPAL *****/
60
61
62  void main (){
63
64      setup_ADC_ports(NO_ANALOGS);           //puerto a y b como digital
65      enable_interrupts(INT_SSP);
66      setup_adc(adc_off);
67      enable_interrupts(GLOBAL);
68      Setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_2);
69      Setup_vref(FALSE);
70
71      Set_Tris_A(0b11111111);               // Puerto A todo entradas
72      set_tris_b(0x03); //puerto B como entrada y salida
73      set_tris_c(0x00); //puerto C com salidas
74      fState = 0;
75
76      for (posicion=0;posicion<0x10;posicion++)
77          buffer[posicion] = 0x00;bufferw[posicion] = 0x00;
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94  while(true)
95  {
96      /* Si el master ha enviado algo */
97      if (EnvioMaster==1)
98      {
99          dah=buffer[4];
100         dal=buffer[3];
101         velocidad=buffer[5];
102         reset=buffer[6];
103         y_p=buffer[7];
104         datos_y=(dah * 256) + dal;
105         EnvioMaster=0; //Preparado para señalar nuevo solicitud del master
106     }
107
108     if (y_p==4){output_high(pin_b6); output_high(pin_b7); datos_y_a=0;output_low(pin_c4);}
109     else if (y_p==8){output_high(pin_b6); output_low(pin_b7); datos_y_a=0;output_low(pin_c4);}
110     else {
111         /// y control
112         if (datos_y > datos_y_a){ output_high(pin_b6); output_high(pin_b7); datos_y_a ++;output_low(pin_c4);}
113         else if (datos_y < datos_y_a){ output_high(pin_b6); output_low(pin_b7); datos_y_a --;output_low(pin_c4);}
114         else{output_high(pin_c4);}
115     }
116     retardo();
117     output_low(pin_b6);
118

```

```

117         output_low(pin_b6);
118         retardo();
119
120         if (reset==1){datos_y=0;datos_y_a=0;}
121     }
122 }
123
124
125
126
127 void retardo ()
128 {
129     i=0;
130     while(i<velocidad)
131     {
132         delay_us(625);
133         i=i+1;
134     }
135 }
136

```

Anexo 5: Programa microcontrolador esclavo eje Z en lenguaje C CCS C compilador

```

1  #include <18F2550.h>
2  #fuses HSPLL,NONDT,NOPROTECT,NOLVP,NODEBUG,USBDIV,PLL5,CPUDIV1,NOVREGEN //configuracion de crystal de 20MHz para operar a 48MHz
3  #use delay(clock=48000000)
4
5  #Byte PortA = 0xF80 // Dirección del puerto A para la familia 18Fxx5k.
6
7  /***** Configuración de la comunicación I2c *****/
8  #use i2c(slave, fast, sda=PIN_B0, scl=PIN_B1, address=0x46)
9
10
11
12 /***** Variables globales *****/
13 /*****
14 byte fstate; //Guardara el estado del bus I2C
15 byte posicion, buffer[0x10],bufferw[0x05]; //Buffer de memoria
16 short EnvioMaster; //Indicación de fin del byte enviado por el master
17 short SolicitudMaster=0; //Indicación de fin de la entrega del byte solicitado por el master
18 int16 datos_z,datos_z_a,velocidad,i;
19 int8 dah,dal,reset,z_p;
20 short nivel_1;
21
22
23 /*****
24 ***** FUNCIÓN INTERRUPTIÓN POR RECEPCION I2C *****/
25 /** Saltará a esta función cada vez que se detecte actividad en el bus I2C **/
26
27 #INT_SSP
28 void ssp_interrupt (){
29
30     int incoming; //Variable donde se recibe el byte que manda el maestro
31
32     fstate = i2c_isr_state(); //Lectura del estado del bus I2c la interrupción
33
34     /* Solicitud de lectura del esclavo por el master */
35     if(fstate == 0x80) {
36         //Manda al maestro la información contenida en la posición de memoria que le ha solicitado
37         i2c_write (bufferw[posicion]);
38         SolicitudMaster=1; //Fin de solicitud del master
39     }

```

```

39 }
40 /* Sino está solicitando lectura es que está enviando algo */
41 else { //Sino es que hay dato en el bus I2C...
42     incoming = i2c_read(); //... lo lee
43
44     if (fState == 1) { //Información recibida corresponde a la posición
45         posicion = incoming; //Se guarda posición
46     }
47     else if (fState == 2) { //Información recibida corresponde al dato
48         buffer[posicion] = incoming; //Se guarda dato
49         EnvioMaster=1; //Fin del envío del master
50     }
51 }
52 }
53 }
54
55 /***** Funcion de puesta a cero *****/
56 void retardo();
57 void nivel();
58 /***** FUNCIÓN PRINCIPAL *****/
59
60 void main (){
61
62     setup_ADC_ports(NO_ANALOGS); //puerto a y b como digital
63     enable_interrupts(INT_SSP);
64     setup_adc(adc_off);
65     enable_interrupts(GLOBAL);
66     Setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_2);
67     Setup_vref(FALSE);
68
69     Set_Tris_A(0b11111100); // Puerto A todo entradas
70     set_tris_b(0x03); //puerto B como entrada y salida
71     set_tris_c(0x00); //puerto C com salidas
72     fState = 0;
73
74     for (posicion=0;posicion<0x10;posicion++)
75         buffer[posicion] = 0x00;

```

```

76     for (posicion=0;posicion<0x10;posicion++)
77         buffer[posicion] = 0x00;bufferw[posicion] = 0x00;
78
79     nivel_1=1;
80     datos_z=0;
81     datos_z_a=0;
82     velocidad=200;
83     reset=0;
84     z_p=0;
85     output_low(pin_a0); // DIR 2
86     output_low(pin_a1); // ENABLE 2
87
88     output_low(pin_b7); // DIR
89     output_low(pin_b6); // STEP
90     output_high(pin_b5); // RESET
91     output_high(pin_b4); // SLEEP
92     output_low(pin_c4); // ENABLE
93
94     output_low(pin_b3); //M2
95     output_high(pin_b2); //M1
96     output_high(pin_c5); //M0
97
98
99
100 while(true)
101 {
102     /* Si el master ha enviado algo */
103     if (EnvioMaster==1)
104     {
105         dah=buffer[4];
106         dal=buffer[3];
107         velocidad=buffer[5];
108         reset=buffer[6];
109         z_p=buffer[7];
110         datos_z=(dah * 256) + dal;
111         EnvioMaster=0; //Preparado para señalar nuevo solicitud del master
112     }
113
114     //Se /...

```

```

113 //if (nivel_1==1){nivel();} //Funcion de anivelado al comensar el ciclo infinito
114
115
116 if (z_p==16){output_high(pin_b6); output_high(pin_b7);output_high(pin_a0); datos_z_a=0;output_low(pin_a1);output_low(pin_c4);}
117 else if (z_p==32){output_high(pin_b6); output_low(pin_b7);output_low(pin_a0); datos_z_a=0;output_low(pin_a1);output_low(pin_c4);}
118 else {
119     /// z control
120     if (datos_z > datos_z_a){ output_high(pin_b6); output_high(pin_b7);output_high(pin_a0); datos_z_a ++;output_low(pin_a1);output_low(pin_c4);}
121     else if (datos_z < datos_z_a){ output_high(pin_b6); output_low(pin_b7);output_low(pin_a0); datos_z_a --;output_low(pin_a1);output_low(pin_c4)}
122     else{output_high(pin_a1);output_high(pin_c4);}
123 }
124     retardo ();
125     output_low(pin_b6);
126     retardo ();
127
128     if (reset==1){datos_z=0;datos_z_a=0;}
129
130 }
131 }
132
133
134
135 void retardo ()
136 {
137     i=0;
138     while(i<velocidad)
139     {
140         delay_us(625);
141         i=i+1;
142     }
143 }
144
145 void nivel ()
146 {
147     while(nivel_1==1)
148     {
149         if ((input(pin_a2))==input(pin_a3)){nivel_1=0;}
150         else if ((input(pin_a2)==0)&(input(pin_a3)==1))
151         {
152             nivel_1=1;
153             output_low(pin_a1);
154             output_high(pin_c4);
155             output_high(pin_b6);output_high(pin_a0);
156             delay_ms(200);
157         }
158         else if ((input(pin_a2)==1)&(input(pin_a3)==0))
159         {
160             nivel_1=1;
161             output_high(pin_a1);
162             output_low(pin_c4);
163             output_high(pin_b6);output_high(pin_b7);
164             delay_ms(200);
165         }
166
167         output_low(pin_b6);
168         delay_ms(200);
169     }
170
171     output_high(pin_a1);output_high(pin_c4);
172 }

```

Anexo 6: Programa microcontrolador esclavo eje E en lenguaje C CCS C compilador

```
1 #include <18F2550.h>
2 #fuses HSPLL,NOMDT,NOPROTECT,NOLVP,NODEBUG,USBDIV,PLL5,CPUDIV1,NOVREGEN //configuración de crystal de 20MHz para operar a 48MHz
3 #use delay(clock=48000000)
4
5 #Byte PortA = 0xF80 // Dirección del puerto A para la familia 18Fxx5k.
6
7 /***** Configuración de la comunicación I2c *****/
8 #use i2c(slave, fast, sda=PIN_B0, scl=PIN_B1, address=0x50)
9
10
11 /***** Variables globales *****/
12 /*****
13
14 byte fstate; //Guardara el estado del bus I2C
15 byte posicion, buffer[0x10],bufferw[0x05]; //Buffer de memoria
16 short EnvioMaster; //Indicación de fin del byte enviado por el master
17 short SolicitudMaster=0; //Indicación de fin de la entrega del byte solicitado por el master
18 int16 velocidad,i; //Datos de posicion
19 int32 datos_e,datos_e_a;
20 int8 dah,dal,reset,dah16,e_p;
21
22
23
24 /*****
25 /***** FUNCIÓN INTERRUPTIÓN POR RECEPCION I2C *****/
26 /*** Saltará a esta función cada vez que se detecte actividad en el bus I2C ***/
27
28 #INT_SSP
29 void ssp_interrupt (){
30
31     int incoming; //Variable donde se recibe el byte que manda el maestro
32
33     fstate = i2c_isr_state(); //Lectura del estado del bus I2c la interrupción
34
35     /* Solicitud de lectura del esclavo por el master */
36     if(fstate == 0x80) {
37         //Manda al maestro la información contenida en la posición de memoria que le ha solicitado
38         i2c_write (bufferw[posicion]);
39         SolicitudMaster=1; //Fin de solicitud del master
40
41         SolicitudMaster=1; //Fin de solicitud del master
42     }
43     /* Sino está solicitando lectura es que está enviando algo */
44     else { //Sino es que hay dato en el bus I2c...
45         incoming = i2c_read(); //... lo lee
46
47         if (fState == 1) { //Información recibida corresponde a la posición
48             posicion = incoming; //Se guarda posición
49         }
50         else if (fState == 2) { //Información recibida corresponde al dato
51             buffer[posicion] = incoming; //Se guarda dato
52             EnvioMaster=1; //Fin del envío del master
53         }
54     }
55 }
56
57 /***** Funcion de puesta a cero *****/
58
59 void retardo();
60
61 /*****
62 /***** FUNCIÓN PRINCIPAL *****/
63
64 void main (){
65
66     Set_Tris_A(0b11111100); // Puerto A todo entradas
67     set_tris_b(0x03); //puerto B como entrada y salida
68     set_tris_c(0x00); //puerto C com salidas
69
70     setup_adc_ports(NO_ANALOGS); //puerto a y b como digital
71     enable_interrupts(INT_SSP);
72     setup_adc(adc_off);
73     enable_interrupts(GLOBAL);
74     Setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_2);
75     Setup_vref(FALSE);
76
77     fState = 0;
78 }
```

```

78
79     for (posicion=0;posicion<0x10;posicion++) // ciclo de reset de bufer
80     bufer[posicion] = 0x00;buffer[posicion] = 0x00;
81
82     /***** Reset de variables *****/
83     datos_e=0;
84     datos_e_a=0;
85     velocidad=200;
86     reset=0;
87     output_low(pin_b7); // DIR
88     output_low(pin_b6); // STEP
89     output_high(pin_b5); // RESET
90     output_high(pin_b4); // SLEEP
91
92     output_high(pin_b3); //M2
93     output_high(pin_b2); //M1
94
95     output_high(pin_a0);
96     output_high(pin_a1);
97
98     output_c(0b00000000);
99
100
101     while(true)
102     {
103         /* Si el master ha enviado algo */
104         if (EnvioMaster==1) // Rececion de datos I2C
105         {
106             dah16=buffer[8];
107             dah=buffer[4]; // Rececion de dato alto
108             dal=buffer[3]; // Rececion de dato bajo
109             velocidad=buffer[5]; // Rececion de velocidad
110             reset=buffer[6]; // Rececion de condicion cero
111             e_p=buffer[7];
112             datos_e=(dah16*256)+ ((dah * 256) + dal); // Union de bits
113             EnvioMaster=0; //Preparado para señalizar nuevo solicitud del master
114         }
115
116         if (e_p==64){output_high(pin_b6); output_high(pin_b7); datos_e_a=0;output_low(pin_c4);}
117         // if (e_p==128){output_high(pin_b6); output_low(pin_b7); datos_e_a=0;output_low(pin_c4);}

```

```

117         else if (e_p==128){output_high(pin_b6); output_low(pin_b7); datos_e_a=0;output_low(pin_c4);}
118         else if (e_p!=192){
119             /// e control
120             if (datos_e > datos_e_a){ output_high(pin_b6); output_high(pin_b7); datos_e_a ++;output_low(pin_c4);} // Control a la derecha
121             else if (datos_e < datos_e_a){ output_high(pin_b6); output_low(pin_b7); datos_e_a --;output_low(pin_c4);} // Control a la izquierda
122             else{output_high(pin_c4);}
123         }
124         retardo ();
125         output_low(pin_b6); // Pulso en bajo
126         retardo ();
127
128         if (reset==1){datos_e=0;datos_e_a=0;}
129     }
130 }
131
132
133
134 void retardo ()
135 {
136     i=0;
137     while(i<velocidad)
138     {
139         delay_us(312);
140         i=i+1;
141     }
142 }
143

```

Anexo 7: Programa microcontrolador esclavo temperatura en lenguaje C CCS C compilador

```
1 #include <18F4550.h>
2 #fuses HSPLL,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP,NODEBUG,USBDIV,PLL5,CPUDIV1,NOVREGEN //configuracion de crystal de 20MHz para operar a 48MHz
3 #DEVICE ADC=10
4 #use delay(clock=48000000)
5 #include <math.h>
6 #include "usb_bootloader.h"
7 #use RS232(BAUD=9600,BITS=8,PARITY=N,XMIT=PIN_C6,RCV=PIN_C7)
8
9 /****** Configuración de la comunicación I2c *****/
10 #use i2c(slave, fast, sda=PIN_B0, scl=PIN_B1, address=0x5A)
11
12
13
14 /****** Variables globales *****/
15
16 byte fstate; //Guardara el estado del bus I2c
17 byte posicion, buffer[0x10],bufferw[0x05]; //Buffer de memoria
18 short EnvioMaster; //Indicación de fin del byte enviado por el master
19 short SolicitudMaster=0; //Indicación de fin de la entrega del byte solicitado por el master
20 float tv,tr,temp,y; // variables para nuestra ecuacion
21 int16 value,d,v,t;
22 float a,b,c; //constantes pid
23 float iT,eT,rT,dT,yT,iT0,eT0,iT_1,eT_1,uT; //variables de ecuacion
24 int8 Duty,velocidad_b,Temperatura_c;
25
26
27 /****** FUNCIÓN INTERRUPTIÓN POR RECEPCION I2c *****/
28 /* Salta a esta función cada vez que se detecte actividad en el bus I2c */
29
30 #INT_SSP
31 void ssp_interrupt (){
32
33     int incoming; //Variable donde se recibe el byte que manda el maestro
34
35     fstate = i2c_isr_state(); //Lectura del estado del bus I2c la interrupción
36
37     /* Solicitud de lectura del esclavo por el master */
38     if(fstate == 0x80) {
39         //Manda al maestro la información contenida en la posición de memoria que le ha solicitado
40         i2c_write(buffer[posicion]);
41         //Manda al maestro la información contenida en la posición de memoria que le ha solicitado
42         i2c_write(buffer[posicion]);
43         SolicitudMaster=1; //Fin de solicitud del master
44     }
45     /* Sino está solicitando lectura es que está enviando algo */
46     else {
47         //Sino es que hay dato en el bus I2c...
48         incoming = i2c_read(); //... lo lee
49
50         if (fstate == 1) { //Información recibida corresponde a la posición
51             posicion = incoming; //Se guarda posición
52         }
53         else if (fstate == 2) { //Información recibida corresponde al dato
54             buffer[posicion] = incoming; //Se guarda dato
55             EnvioMaster=1; //Fin del envio del master
56         }
57     }
58 }
59
60
61 /****** FUNCIÓN PRINCIPAL *****/
62
63 void main (){
64
65     set_tris_b(0x03); //puerto B como entrada y salida
66     set_tris_c(0b10000000);
67     setup_timer_2(t2_div_by_16,255,1);
68     setup_adc_ports(AN0|VSS_VDD);
69     setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_2);
70     setup_wdt(WDT_OFF);
71     setup_ccp1(CCP_PWM);
72     setup_ccp2(CCP_PWM);
73     //setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
74     enable_interrupts(INT_SSP);
75     enable_interrupts(GLOBAL);
76     Setup_vref(FALSE);
77
78     fstate = 0;
```

```

77
78 fState = 0;
79 iT_1=0.0;
80 eT_1=0.0;
81 a=0.1243;//0.1243
82 b=0.1000;//0.0062
83 c=0.6215;//0.6215
84 uT=0;
85 velocidad_b=50*2.55;
86 temperatura_c=50;
87 for (posicion=0;posicion<0x10;posicion++) // ciclo de reset de bufer
88   buffer[posicion] = 0x00;bufferw[posicion] = 0x00;
89   set_adc_channel(0);
90
91 while(true)
92 {
93   /* Si el master ha enviado algo */
94   if (EnvioMaster==1) // Rececion de datos I2C
95   {
96     Temperatura_c=buffer[3]; // Temperatura de control
97     velocidad_b=buffer[4]*2.55; // velocidad ventilador
98     EnvioMaster=0; //Preparado para señalar nuevo solicitud del master
99   }
100
101   value=read_adc();
102   // FORMULA INICIO
103   tv=5*value/1024.0;
104   tr=tv*100000.0/(5.0-tv);
105   y=log(tr/100000.0); // para linealizar la curva de respuesta del sensor
106   y=(1.0/298.15)+(y*(1.0/3950.0));
107   temp=1.0/y;
108   temp= temp-273.15;
109   //control pid
110   yT=temp;
111   rT=Temperatura_c;
112   eT=rT-yT;
113   iT=b*eT+iT0;
114   dT=c*(eT-eT0);
115   uT=iT+a*eT+dT;
116   if (uT>=255){uT=255;}

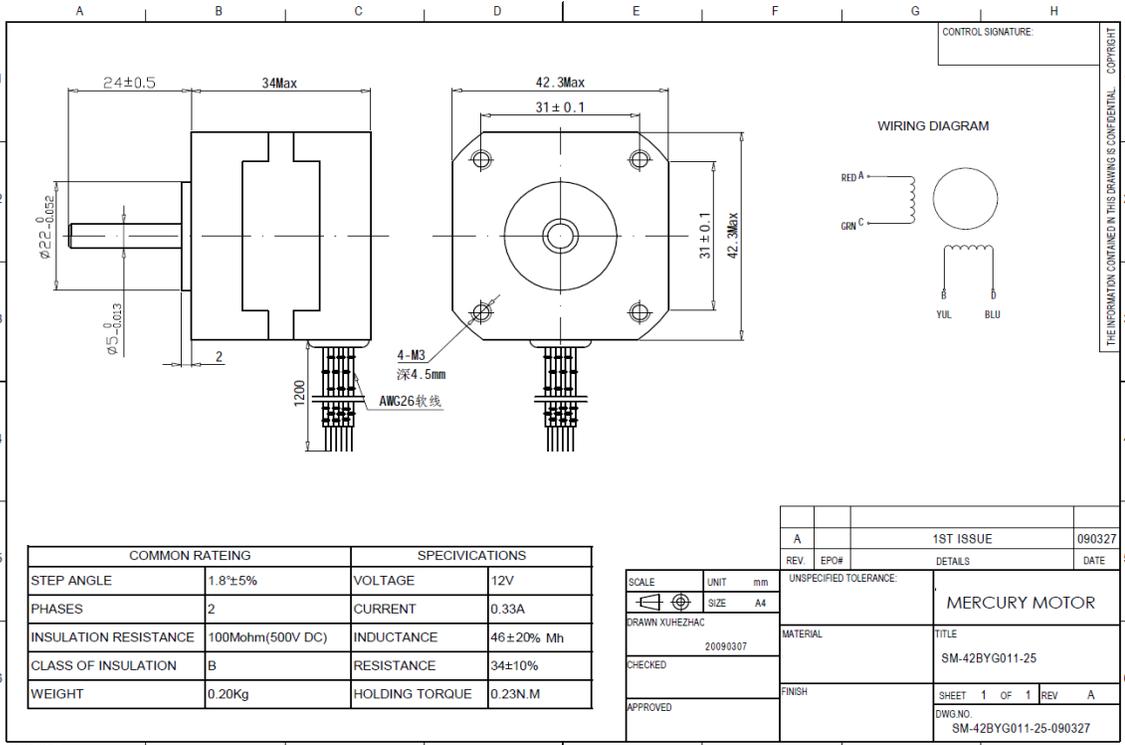
```

```

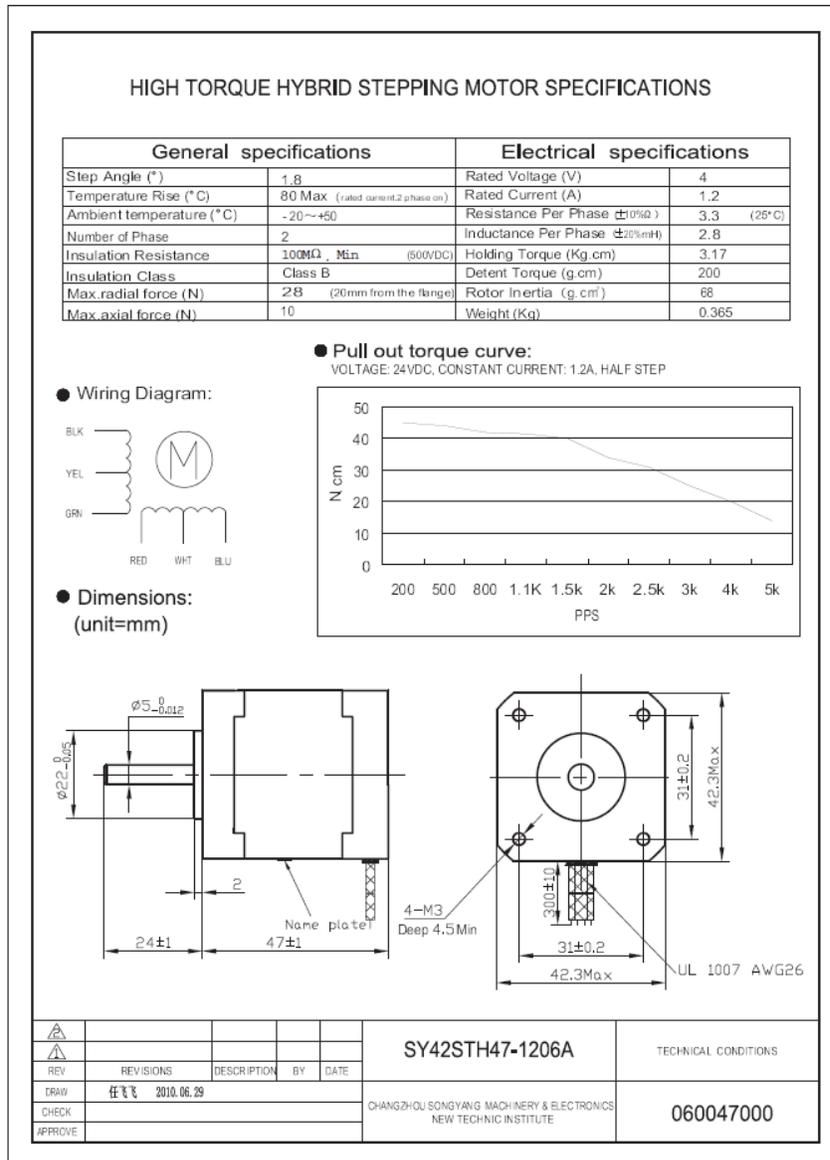
115   uT=iT+a*eT+dT;
116   if (uT>= 255){uT=255;}
117   else if (uT<=0){uT=0;}
118   Duty=uT;
119   printf("%Tf\n",temp);
120   printf("%Lld\n",t=temperatura_c);
121   printf("%Vld\n",v=velocidad_b);
122   printf("%Cld\n",d=Duty);
123   set_pwm1_duty(Duty);
124   set_pwm2_duty(velocidad_b);
125   iT0=iT;
126   eT0=eT;
127   delay_ms(100);
128
129 }
130
131 ]

```

Anexo 8: Datos motor a pasos SM-42BYG011-25EN



Anexo 9: Datos motor a pasos SY42STH47-1206^a



Anexo 10: Datos motor a pasos YH42BYGH7



Step Motor 42BYGH7-401A
SKU: 316020003

Description

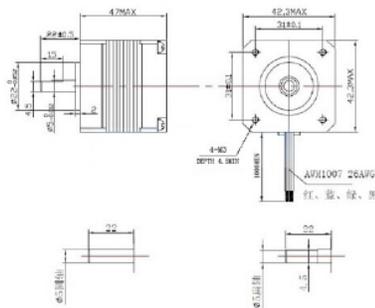
It mainly used in mechanical motion control, Like CNC milling machine, laser cutter, 3D printer, it also can used in robot platform motion control.

Specification:

- Phase: 2
- Step Angle: 1.8°
- Voltage: 24
- Phase Current: 1.5A/Phase
- Phase Resistance: 1.6ohm/Phase
- Phase inductance: 2.8mH/Phase
- Holding Torque: 5500g.cm
- Lead Wire: 4

•Insulation Class: B

外形尺寸 单位: mm



Anexo 11: Datos microcontrolador PIC18F4550

<https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>