

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

TEMA

**SISTEMA DE MOVIMIENTO GIRATORIO Y SELECCIÓN DE CUATRO
EXTRUSORES PARA UNA IMPRESORA 3D**

AUTOR

JORGE EDUARDO MÉNDEZ ESTÉVEZ

DIRECTOR

ING. DANIEL ÁLVAREZ. MSC.

Ibarra-Ecuador

2018

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Identificación de la Obra

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad. Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

Datos de Contacto			
Cédula de Identidad:	1003324876		
Apellidos y Nombres:	Méndez Estévez Jorge Eduardo		
Dirección:	Ibarra, calles Víctor Mideros 1-51 y Dr. Raúl Montalvo		
Email:	jemendeze@utn.edu.ec		
Teléfono Fijo:	062547245	Teléfono Móvil:	0990739906

Datos de la Obra	
Título:	Sistema de movimiento giratorio y selección de cuatro extrusores para una impresora 3D.
Autor:	Méndez Estévez Jorge Eduardo
Fecha:	Julio-2017
Programa:	PREGRADO
Título por el que Opta:	Ingeniero en Mecatrónica
Director:	Ing. Daniel Álvarez. MSc.

Autorización de Uso a Favor de la Universidad

Yo, Méndez Estévez Jorge Eduardo con cédula de identidad Nro. 1003324876, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Constancias

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrollo sin violar derechos de autores de terceros, por lo tanto la obra es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 15 días del mes Febrero del 2017



Firma

Nombre: Méndez Estévez Jorge Eduardo

Cédula: 1003324876

Certificación

En calidad de tutor del trabajo de grado titulado: "SISTEMA DE MOVIMIENTO GIRATORIO Y SELECCIÓN DE CUATRO EXTRUSORES PARA UNA IMPRESORA 3D", certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el señor Méndez Estévez Jorge Eduardo, bajo mi supervisión.



Ing. Daniel Álvarez. MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

Agradecimiento

Agradezco a mis padres por haberme dado el mejor regalo que puede recibir un hijo, la educación, y por guiarme en cada paso que he dado en mi vida. A mi hermana por su apoyo incondicional, ayudándome a superar en todo lo que me he planteado. A mis compañeros, familiares y amigos, que han sabido estar conmigo en cada momento de alegría y tristeza. A mis profesores, que con su sabiduría y conocimientos me permitieron conseguir una nueva meta en esta etapa de mi vida. Y por último a mi director de tesis, por dedicar parte de su tiempo, para ayudarme con la culminación del presente trabajo.

Jorge Méndez.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, hermana y demás familiares, quienes son la base fundamental de mi vida, a ellos que siempre estuvieron apoyándome en todo momento de mi vida como estudiante, y que me han formado como una persona responsable, con valores, ética, y sabiduría,

Jorge Méndez.

Resumen

En este proyecto de tesis se presenta un sistema multiextrusor para una impresora 3D, el cual a través de su movimiento giratorio permite la selección de 4 cabezales extrusores, permitiendo trabajar con un solo cabezal a la vez, evitando que los demás cabezales extrusores interrumpan el proceso de impresión.

Este sistema al ser desmontable y liviano se acopla fácilmente al sistema de generación de movimiento en los ejes X, Y, Z, de la impresora 3D, y que gracias a su resolución, se obtiene excelentes calidades de impresión, llegando a imprimir en más de un solo color y/o material.

Con el sistema multiextrusor se puede trabajar con varios tipos de materiales, logrando robustez utilizando filamentos de tipo ABS, PLA, Fibra de carbono, u obteniendo flexibilidad gracias al TPU.

Abstract

This project presents a 3D Printer multiextruder system, which through its rotating movement allows the selection of 4 extruder heads, allowing to work with only one head at time, preventing the other three heads extruders interrupt the printing process.

This system, being removable and lightweight, is easily coupled to the movement generation system on the X, Y, Z axes of the 3D printer, and thanks to its resolution, excellent printing qualities are obtained, even printing more than a single color and / or material.

With the multi-extrusion system, it is possible to work with several types of materials, such as filaments as ABS, PLA, Carbon Fiber type, or obtaining flexibility thanks to the TPU.

Tabla de contenido

Identificación de la Obra	ii
Autorización de Uso a Favor de la Universidad	¡Error! Marcador no definido.
Constancias.....	¡Error! Marcador no definido.
Certificación	¡Error! Marcador no definido.
Agradecimiento	v
Dedicatoria	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
Tabla de contenido	ix
Índice de Figuras	xv
Índice de Tablas.....	xvii
Capítulo I.....	1
Descripción del Problema	1
Objetivo General	2
Objetivos Específicos	2
Antecedentes	2
Justificación.....	4
Alcance.....	5
Capítulo II	6
Marco Teórico	6
2.1. La Impresión 3d	6

2.2. Historia de la Impresión 3D	6
2.3. Aplicaciones de la impresión 3D.....	8
2.4. Tipos de tecnologías en impresión 3D	8
2.5. Modelado por Deposición Fundida (FDM).....	9
2.5.1. Ventajas y desventajas del modelado por deposición fundida.	10
2.5.2. Materiales utilizados en la tecnología FDM.	10
2.5.2.1. PLA	10
2.5.2.2. ABS	11
2.5.2.3. TPU	11
2.5.2.4. Fibra de Carbono	11
2.6. Cabezal Extrusor	12
2.6.1. Partes del cabezal extrusor	12
2.6.1.1. Motor paso a paso	12
2.6.1.2. Engranaje de tracción	12
2.6.1.3. Rodamiento de presión.....	12
2.6.1.4 Calentador	12
2.6.1.5. Sensor de temperatura	12
2.6.2. Tipos de cabezales extrusores	13
2.6.2.1. Extrusión Directa.....	13
2.6.2.2. Extrusión con cable Bowden.....	14
2.7. Tipos de extremos calientes	15
2.7.1. Extremo caliente E3D	15

2.7.2. Extremo caliente tipo hexagonal	15
2.8. Servomotor DC	16
2.9. Motor a pasos	16
2.9.1. Ventajas y desventajas de servomotores DC y motores a pasos.	17
2.10. Sistemas de transmisión de potencia mecánica	18
2.10.1. Transmisión por banda	18
2.10.2. Transmisión por correa.....	18
2.10.3. Transmisión piñón-engranaje	19
2.10.4. Transmisión piñón-cremallera.....	19
2.11. Sistemas de control.....	20
2.11.1. Sistema de control en lazo abierto.....	20
2.11.2. Sistema de control en lazo cerrado.....	20
2.12. Tarjeta Azteeg X3 PRO.....	21
2.13. Tarjeta Duet Ethernet	21
2.14. Plataforma Caliente	22
2.15. Niquelinas Eléctricas.....	22
2.16. Placa PCB FR4.....	23
2.17. Calentador de silicona	23
2.18. PanelDue	24
2.19. Código G	24
CAPITULO III	25
METODOLOGÍA	25

3.1. Pasos para el diseño.....	25
3.2. Requisitos Funcionales.....	25
3.3. Requisitos de diseño.....	26
3.4. Selección de alternativas	26
3.4.1. Selección del extremo caliente.....	27
3.4.1.1. Cartucho calentador.....	28
3.4.1.2. Sensor de temperatura	28
3.4.2. Selección del tipo de extrusión.....	29
3.4.3. Selección de motores.....	29
3.4.3.1. Selección del motor para cada cabezal de extrusión	30
3.5. Diseño del cabezal multiextrusor	35
3.5.1. Distribución geométrica de los cabezales extrusores.....	36
3.5.2. Selección del material del plato circular	36
3.5.3. Movimiento del cabezal multiextrusor.....	37
3.5.3.1. Cálculo del torque necesario para el movimiento del plato	37
3.5.4. Diseño del sistema de transmisión engrane-piñón	39
3.5.4.1. Selección de rodamientos.....	43
3.5.5. Selección del motor para el movimiento del sistema multicabezal.....	43
3.5.6. Diseño del eje del cabezal multiextrusor.....	43
3.5.6.1. Diseño mediante cálculo analítico.....	43
3.5.7. Sujetadores	47
3.6. Electrónica.....	47

3.6.1. Selección de la plataforma caliente	49
3.6.2. Selección de la fuente para el sistema de acarreo	49
3.6.3. Selección de la fuente para los calentadores	50
3.6.4. Selección del cableado	50
3.7. Nivelación de la plataforma caliente	50
3.8 Control de la impresora 3D	50
3.8.1. Diagramas de flujo	51
3.8.2. Cálculo de los parámetros y configuraciones del firmware de la tarjeta controladora Duet	54
3.8.2.1. Cálculo de la relación de pasos para el control de motores de los cabezales extrusores	54
3.8.2.2 Parámetros para el control de calentadores	55
3.8.2.3. Parámetros para el control de las herramientas	55
3.8.2.4 Parámetros para el control del motor del multicabezal	56
3.8.3. Código para impresión multicolor.....	58
CAPITULO IV	59
RESULTADOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	59
4.1. Resultado del funcionamiento del cabezal multiextrusor.....	59
4.2. Resultado del funcionamiento de un cabezal extrusor.	60
4.3. Prueba de impresión con un cabezal extrusor	61
4.4. Prueba de impresión con dos cabezales extrusores	62
CAPÍTULO V	67

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
Conclusiones	67
Recomendaciones.....	68
Bibliografía.....	69
ANEXOS.....	76

Índice de Figuras

Figura 1. Proceso de impresión mediante tecnología FDM..	9
Figura 2. Funcionamiento del sistema de extrusión directa.	13
Figura 3. Funcionamiento del sistema de extrusión con cable bowden.	14
Figura 4. Extremo caliente E3D tipo Bowden.	15
Figura 5. Extremo caliente hexagonal.	16
Figura 6. Servomotores DC.	16
Figura 7. Motor a pasos.	17
Figura 8. Transmisión por banda.	18
Figura 9. Transmisión por cadena.	19
Figura 10. Transmisión piñón-engrane.	19
Figura 11. Transmisión Piñón-Cremallera.	19
Figura 12. Esquema de un sistema de control en lazo abierto.	20
Figura 13. Esquema de un sistema de control en lazo cerrado.	21
Figura 14. Tarjeta controladora Azteeg X3 PRO.	21
Figura 15. Tarjeta controladora Duet junto con su tarjeta de expansión.	22
Figura 16. Niquelina eléctrica.	23
Figura 17. Base caliente tipo PCB FR4.	23
Figura 18. Base caliente fabricada de siliona.	24
Figura 19. Panel táctil PanelDue de 7 pulgadas.	24
Figura 20. Cartucho Calentador 12V-30W.	28
Figura 21. Termistor EPCOS 100K.	28
Figura 22. Elementos del extremo caliente o fundidor	31
Figura 23. Mecanismo MK8.	35
Figura 24. Geometría del plato circular.	36

Figura 25. Análisis de la carga en el eje de la placa.....	43
Figura 26. Análisis de la fuerza cortante máxima y el momento flector máximo.	44
Figura 27. Deformación unitaria del eje.....	46
Figura 28. Desplazamiento del eje en el eje de las abcisas.	46
Figura 29. Factor de seguridad.....	46
Figura 30. Sistema de nivelación de la plataforma caliente a través de resortes.	50
Figura 31. Esquema del sistema de control de la impresora 3D multiextrusor.....	51
Figura 32. Flujograma del sistema de control general de la máquina.	51
Figura 33. Flujograma del funcionamiento de la máquina para impresión en un color.....	52
Figura 34. Flujograma del funcionamiento de la máquina para impresión de dos o más colores.	53
Figura 35. Posición de los cabezales extrusor.....	57
Figura 36. Sistema multiextrusor desmontado.....	59
Figura 37. Sistema multiextrusor montado sobre el eje X.	59
Figura 38. Funcionamiento de un cabezal extrusor.	61
Figura 39. Mano impresa en un color.	62
Figura 40. Proceso de impresión en dos colores, capa 3.....	62
Figura 41. Proceso de impresión en dos colores, capa 5.....	63
Figura 42. Proceso de impresión, capa 10.....	63

Índice de Tablas

Tabla 1 Principales técnicas utilizadas en la impresión 3D.	8
Tabla 2. Ventajas y desventajas del modelado por deposición fundida.	10
Tabla 3. Ventajas y desventajas del sistema de extrusión directa.	13
Tabla 4. Ventajas y desventajas del sistema de extrusión con cable bowden.	14
Tabla 5. Ventajas y desventajas de servomotores DC y motores a pasos.	17
Tabla 6. Requisitos de diseño de la impresora 3D multiextrusor.	26
Tabla 7. Criterios de ponderación para la selección de alternativas.	26
Tabla 8. Criterios de selección del extremo caliente.	27
Tabla 9. Criterios de selección del tipo de extrusión.	29
Tabla 10. Criterios de selección del motor.	30
Tabla 11. Motores a pasos Nema comunes para aplicaciones de control numérico e impresión 3D.	33
Tabla 12. Características del motor Nema 17.	33
Tabla 13. Peso del Cabezal Extrusor.	35
Tabla 14. Tabla de coeficientes de trabajo a la flexión.	41
Tabla 15. Criterios de selección tarjeta controladora.	47
Tabla 16. Criterios de selección plataforma caliente.	49
Tabla 17. Código para impresión multicolor.	58
Tabla 18. Determinación del error del material de extrusión.	60
Tabla 19. Costos del proyecto	64

Capítulo I

Descripción del Problema

Las impresoras 3D consideradas de bajo costo disponibles en el mercado actual, poseen uno o dos extrusores, lo que se dificulta el trabajo con filamento 3D de diferente color. Para aplicaciones mecánicas y/o biomecánicas es necesario trabajar con diferentes tipos de material, ya que aparte del color, se debe considerar otras características del material como la densidad, elasticidad, resistencia que vaya acorde al diseño que se desee imprimir.

En la carrera de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte en su línea de investigación de biomecánica se ha planteado construir una impresora multiextrusor 3D, para realizar pruebas en impresión de varios materiales en una misma pieza, lo que mejoraría los procesos de impresión permitiendo un trabajo constante de largo funcionamiento y el prototipado rápido de elementos mecánicos y biomecánicos.

Es por ello, que se propone el desarrollo de un Sistema de movimiento giratorio y selección de 4 extrusores para una impresora 3D que permita fabricar objetos con multitud de filamentos.

Objetivo General

Implementar un sistema de movimiento giratorio y selección de cuatro extrusores para una impresora 3D.

Objetivos Específicos

- Seleccionar el tipo de extrusor a utilizar según el tipo de material a imprimir.
- Diseñar el sistema mecánico multiextrusor.
- Realizar la programación para la selección automática de los extrusores.
- Montar el sistema multiextrusor en el prototipo de Impresora 3D.
- Validar el prototipo.

Antecedentes

En el país y en el mundo se pueden encontrar impresoras 3D que cuentan con uno o dos extrusores que trabajan con un solo tipo de material pero para diferente color, además se pueden encontrar impresoras multiextrusoras que por su alto costo no son muy conocidas y no son muy comerciales en el mercado. Por lo tanto para la realización del tema propuesto se ha tomado como guías los siguientes trabajos:

Ali, M., Mir-Nasiri, N., & Ko, W. (2015). *Multi-nozzle extrusion system for 3D printer*. Springer-Verlag, London. Recuperado el 31 de Julio de 2017, de https://www.researchgate.net/profile/Match_Ko/publication/288931563_Multi-nozzle_extrusion_system_for_3D_printer_and_its_control_mechanism/links/57f66e7f08ae8da3ce576eef/Multi-nozzle-extrusion-system-for-3D-printer-and-its-control-mechanism.pdf

Guerrero, E. (2017). *Cabezal multiextrusor para 3D*. Ibarra. Recuperado el 17 de Noviembre de 2017, de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/7301>

Han, S., Xiao, Y., Li, Z., & Zeng, Q. (2017). *Design and Analysis of Fused Deposition Modeling 3D Printer*. Recuperado el 22 de Agosto de 2017, de <https://www.hindawi.com/journals/amse/2017/2095137/>

Laureto, J., & Pearce, J. (2017). *Open Source Multi-Head 3D Printer for Polymer-Metal*. United States. Recuperado el 17 de Julio de 2017, de <http://www.mdpi.com/2227-7080/5/2/36/pdf>

Rodríguez García, J., & Lázaro Blanco, A. (2014). *Implementación de triple extrusor sobre impresora 3D de bajo coste*. Madrid, España. Recuperado el 22 de Agosto de 2017, de https://orff.uc3m.es/bitstream/handle/10016/22522/PFC_juan_pablo_rodriguez_garcia_2014.pdf

Ruiz, G. (2018). *Implementación de un sistema multicabezal a una impresora 3D*. Ibarra. Recuperado el 1 de Enero de 2018

Justificación

La realización de una impresora 3D multi-extrusor permitirá que los laboratorios de la carrera tengan la posibilidad de realizar prototipado rápido en varios colores y materiales para aplicaciones biomecánicas o mecánicas.

Por lo tanto se podrá experimentar con diferentes tipos de filamentos, ya sea para lograr robustez utilizando filamentos de tipo ABS, de Fibra de carbono; o para obtener flexibilidad gracias al TPU; o simplemente optimizar el material de soporte gracias a filamentos solubles en líquidos específicos.

Los principales beneficiarios con la realización de este proyecto serán las personas que necesiten algún dispositivo mecánico y/o biomecánico para mejorar su calidad de vida, obteniendo dispositivos a bajo costo y a medida.

También, serán beneficiados los docentes-investigadores y estudiantes de la carrera de Mecatrónica ya que contarán con una máquina de laboratorio que permita el desarrollo de futuras investigaciones relacionadas con la biomecánica.

Alcance

Se plantea implementar un sistema de movimiento giratorio y selección de cuatro extrusores para una impresora 3D adaptable para 4 diferentes tipos de materiales de impresión; ABS, PLA, TPU y Fibra de Carbono, enfocado para aplicaciones mecánicas o biomecánicas, principalmente para la fabricación de prótesis a medida de diferente color y tipo de material, reduciendo su costo y permitiendo que ésta se adapte de buena manera a las necesidades del usuario.

Capítulo II

Marco Teórico

2.1. La Impresión 3d

La impresión 3D ha experimentado un fuerte crecimiento en los últimos años ya que es una tecnología que funciona muy diferente, comparada con las tres técnicas principales de fabricación de objetos. La aplicación del esculpido, fresado o perforación requiere la utilización de numerosas herramientas, máquinas y diferentes materiales. Por lo tanto la impresión 3D permite fabricar objetos mediante la superposición de capas sucesivas (fabricación aditiva); así la impresión 3D viene a ser una opción barata y una solución para quienes requieran fabricar objetos en infinidad de materiales empleando poco tiempo. Así la impresión 3D se lleva a cabo con la ayuda de una impresora 3D. Ésta máquina puede variar en forma, tamaño, costos, técnica utilizada, etc.; y siempre está relacionada con sistemas informáticos indispensables para el proceso de impresión, pues permiten preparar el archivo 3D del objeto (diseño CAD) y controlar la máquina durante todo el proceso de impresión (Berchon & Luyt, 2014).

2.2. Historia de la Impresión 3D

El inicio de la impresión 3D fue a partir del año 1976, cuando se inventó la impresora de inyección de tinta. En 1984 se realizan adaptaciones, avances y transforman la técnica de impresión con tinta a impresión con materiales. Charles Hull inventa el primer método de impresión 3D, la estereolitografía, (proceso de impresión que permite la solidificación de un líquido mediante rayo láser UV y que un objeto 3D se cree a partir de datos digitales). En el año 1988, la compañía 3D Systems, fundada por Chuck Hull, comercializa las primeras máquinas de impresión basadas en estereolitografía. A principios de los años 1988 se desarrollan nuevas tecnologías como la sinterización selectiva por láser (fusión de partículas de polvo), y la impresión por FDM (Modelado por deposición fundida) creada por Scott Crum, quién en 1990 la comercializa a través de su empresa Stratasys. Ya en 1999, órganos de

ingeniería traen nuevos avances en medicina, y en 2002, se diseñan órganos completamente funcionales fabricados en 3D. En 2005, el Dr. Adrian Bowyer funda RepRap, en la Universidad de Bath, una iniciativa de código abierto para construir una impresora 3D que pueda imprimir la mayoría de sus propios componentes. En 2006, se construye la primera impresora SLS más viable, dando paso a la fabricación bajo demanda de piezas industriales y prótesis. En el mismo año, Object, el proveedor de materiales e impresoras 3D, crea una impresora con la capacidad de imprimir una pieza con variedad de densidades y propiedades de material incluyendo polímeros y elastómeros. En 2008, RepRap saca a la luz a Darwin, la primera impresora 3D con capacidad de autorreplicarse, en el mismo año Shapeways lanza los servicios de co-creación, y posteriormente se realizan grandes avances en impresión de prótesis en 3D. En el año 2009, industrias Makerbot (compañía de hardware de código abierto para impresoras 3D) comienza con la venta de kits de montaje. También llega la bio-impresión permitiendo imprimir el primer vaso sanguíneo. En el año 2011, ingenieros de la Universidad de Southampton diseñaron y planearon el primer avión impreso en 3D; Kor Ecologic presenta Urbee, un prototipo de automóvil, tratando de ser eficiente con el medio ambiente, consumo de combustible y costo de producción; en el mismo año, la empresa Materialise se transforma en la primera empresa en ofrecer servicio de impresión 3D de oro de 14 kilates y plata. En el año 2012, se llega a imprimir prótesis de mandíbulas personalizadas a través de la impresora diseñada por la empresa LayerWise. Ya en el año 2014, se desarrollan impresoras 3D BAAM, las cuales tienen producen objetos de gran tamaño a altas velocidades, siendo 200 a 500 veces más rápidas que las típicas impresoras 3D. (Infographics, 2011).

Finalmente se prevé que la impresión 3D seguirá mejorando a través de los años, pudiéndose fabricar objetos complejos en diferentes materiales y colores, además también se permitirá ganar tiempos de producción y tener un considerable ahorro de materiales, a

diferencia de la mecanización tradicional, en la que las pérdidas de material representan del 80 a 90%, y el material perdido no es reutilizable.

2.3. Aplicaciones de la impresión 3D

Mediante la impresión 3D es posible fabricar formas geométricas muy complejas, pueden fabricarse objetos sin necesidad de ensamblaje posterior alguno, además la precisión que tienen algunas tecnologías, permiten fabricar objetos únicos con muchos detalles. Así entre los sectores que utilizan las tecnologías de impresión 3D se encuentran: la industria, joyería, odontología, aeroespacial, automovilístico, órganos y prótesis humanas, arquitectura, alimentación, etc (Oyandedel, 2017).

2.4. Tipos de tecnologías en impresión 3D

Existen muchas técnicas de impresión 3D basadas en fabricación aditiva, en donde cada una tiene sus propias ventajas e inconvenientes y se diferencian de acuerdo a la tecnología usada, materiales de fabricación, velocidad, resolución de impresión, costos, etc. En la Tabla 1 se muestran las principales técnicas de impresión a nivel mundial.

Tabla 1 Principales técnicas utilizadas en la impresión 3D.

Tecnologías	Descripción	Tipos	Materiales
Estereolitografía (SLA)	Solidificación de un líquido mediante rayo láser		Fotopolímeros líquidos y resinas fotosensibles
Procesamiento de luz digital (DLP)	Foto polimerización por luz ultravioleta	Fotopolimerización	Resina translúcida, ceras de moldeado
PolyJet	Inyección de fotopolímeros		Resinas, Fotopolímeros translúcidos
Sinterización selectiva por láser (SLS)	Fusión de partículas de polvo		Polvo cerámico, Poliamida
Sinterización directa de metal por láser (DMLS)	Fusión de partículas de polvo metálico con un láser de electrones	Sinterización de polvo	Acero inoxidable, aluminio, níquel, acero mantensítico, cromo-cobalto, titanio, vanadio, hierro, cobre.
3DP	Laminado de papel por depósito selectivo		Cerámica, metal, polímeros, compuestos

Modelado por deposición fundida (FDM),	Extrusión	Depósito de filamento fundido	Termoplásticos (PLA, PET, ABS, Nylon), HDPE, Policarbonatos(PC), policaprolactonas (PCL), materiales comestibles, madera, fibra de carbono, siliconas, porcelana, plastilina, arcillas, metales, ceras.
--	-----------	-------------------------------	---

NOTA. Fuente: (Berchon & Luyt, 2014).

2.5. Modelado por Deposición Fundida (FDM)

Es el proceso de impresión 3D más antiguo y consiste en depositar sucesivamente un filamento termoplástico. Las impresoras que trabajan con ésta tecnología usan una boquilla de extrusión a través de la cual pasa el filamento, y se va depositando el material sobre una plataforma de impresión. El material se funde a más de 185°C y es depositado en capas muy finas (0,04mm de grosor), permitiendo que la capa anterior depositada se endurezca y se adhiera a la siguiente capa desde la base a la cima. Los materiales utilizados por la FDM son generalmente termoplásticos como ABS o PLA. En la Figura 1 se puede observar el proceso de impresión de la tecnología FDM (Ortega, 2017).

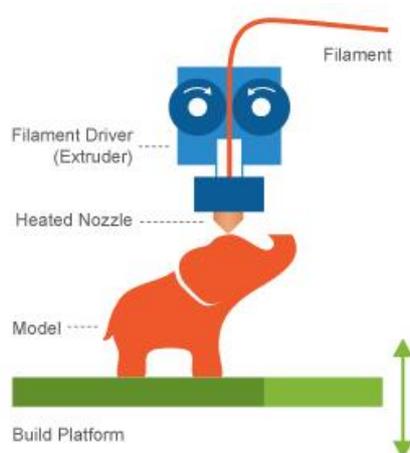


Figura 1. Proceso de impresión mediante tecnología FDM. **Fuente:** (Spadaro, 2016).

2.5.1. Ventajas y desventajas del modelado por deposición fundida.

Tabla 2. Ventajas y desventajas del modelado por deposición fundida.

Ventajas	Desventajas
Facilidad de uso.	Precisión limitada
Se usa materiales económicos.	Área de trabajo y tamaños de impresión limitados
No provoca desechos tóxicos.	Los materiales son propensos a sufrir warping y deslaminado.
Versatilidad del material, se puede imprimir en varios colores y materiales.	Acabado granulado.
No requiere mucho mantenimiento.	Dificultad en la fabricación de diseños complejos.
Es la tecnología económicamente más accesible.	

NOTA. Fuente: (Martín, 2014).

2.5.2. Materiales utilizados en la tecnología FDM.

Los materiales más utilizados con la tecnología FDM son el PLA y el ABS, pero en ésta sección sólo se tratará los siguientes materiales: PLA, ABS, PTU y ABS-Fibra de carbono.

2.5.2.1. PLA

PLA, o ácido Polilático, clasificado también como plástico de poliéster, es el material más popular en impresión 3D con FDM, el cual es un material rígido que no requiere de una cama de impresión, ya que tiene una gran adherencia en su estado líquido. Este material es imprimible con cualquier impresora FDM existente en el mercado y no sufre expansión y contracción de volumen cuando se calienta (warping). Existen también los llamados materiales híbridos de PLA que además del PLA contienen algún otro material como materia de carga que

pueden ser madera, metal, fibra de carbono, fibra de bambú, etc (Ortega, 2017). Para ver propiedades del PLA ver Anexo 1.

2.5.2.2. ABS

ABS, o acrilonitrilo butadieno estireno, es también otro termoplástico más utilizado en la impresión 3D, resistente y duro que permite ser lijado, pulido, taladrado, pintado y pegado. Al ser el ABS soluble en acetona, permite una vez impresa la pieza, como técnica de post procesado, tener un mejor acabado y suavizado. Estas características lo hacen idóneo para piezas mecánicas que necesiten ser manipuladas después de la impresión (Ferrer, makerShop, 2014). Para ver propiedades del ABS ver Anexo 2.

2.5.2.3. TPU

Es un filamento flexible fabricado de poliuretano termoplástico (TPU), se puede alargar hasta un 660%, y su composición de poliuretano permite una reducción de la vibración. Se adhiere a todas las plataformas de construcción sin pegamento o cinta. El resultado al imprimir con este material son impresiones sumamente flexibles y elásticas, ideales para extrusoras de accionamiento directo. Entre sus aplicaciones se encuentran: sellos, tapones, aplicaciones protectoras, prótesis ortopédicas, plantillas y suelas de zapatos (NinjaTek, s.f.). Para ver propiedades del TPU ver Anexo 3.

2.5.2.4. Fibra de Carbono

Existen filamentos híbridos PLA o ABS que contienen material de carga como fibra de carbono, en ésta sección se tratará únicamente El filamento ABS reforzado con fibra de carbono. El ABS reforzado con fibra de carbono es un termo polímero de alto rendimiento, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren alta rigidez, estabilidad dimensional mejorada y mayor resistencia térmica. Su uso esta adecuado en todas las impresoras FDM (3dxtech, 2017). Para ver propiedades del ABS-Fibra de carbono ver Anexo 4.

2.6. Cabezal Extrusor

El cabezal extrusor es el mecanismo que se encarga de extruir el filamento y depositar el material fundido sobre la superficie de impresión (Guerrero, 2017).

2.6.1. Partes del cabezal extrusor

El cabezal extrusor está compuesto de varias piezas y puede diferenciarse con otras impresoras de acuerdo al tipo o modelo de impresora con la que se esté trabajando.

2.6.1.1. Motor paso a paso

Este tipo de motor se utiliza para el acarreo del material, el cual gira en pequeños pasos destinados para extruir la cantidad exacta de material (Rodríguez J. , 2014).

2.6.1.2. Engranaje de tracción

Es un engrane pequeño que va acoplado al eje del motor a pasos que permite el acarreo del filamento, permitiéndose desplazar según el movimiento del motor a pasos (Rodríguez J. , 2014).

2.6.1.3. Rodamiento de presión

Es un simple rodamiento que hace presión el filamento sobre el engranaje de tracción para poder guiarlo y que el filamento se pueda deslizar de acuerdo al movimiento del motor (Rodríguez J. , 2014).

2.6.1.4 Calentador

Es el encargado de calentar la boquilla del extrusor para que éste alcance la temperatura requerida. El calentador puede ser del tipo resistivo, ya que posee buenas características de conducción térmica (filament2print, 2016).

2.6.1.5. Sensor de temperatura

Se encarga de medir la temperatura permitiendo que el sistema de control de la impresora realice un correcto control de la temperatura del extrusor. Pueden ser del tipo

electrónicos como: termopares, RTD, Termistores (NTC-PTC), cuya salida es analógica (Rodríguez J. , 2014).

2.6.2. Tipos de cabezales extrusores

Los tipos de cabezales extrusores se dividen de acuerdo al tipo de extrusión, en la tecnología FDM se pueden distinguir los tipos de extrusión más utilizados, la extrusión directa y la extrusión con cable bowden (Rodríguez J. P., 2014).

2.6.2.1. Extrusión Directa

Es un sistema de extrusión muy efectivo y es el más simple, se caracteriza por tener el extremo caliente empotrado en el propio cabezal extrusor, es decir el conjunto del extrusor está colocado en una sola parte mecánica llamada carro, que se desplaza en uno o en dos ejes. Esto permite un control preciso sobre el plástico extruido (Rodríguez J. P., 2014).

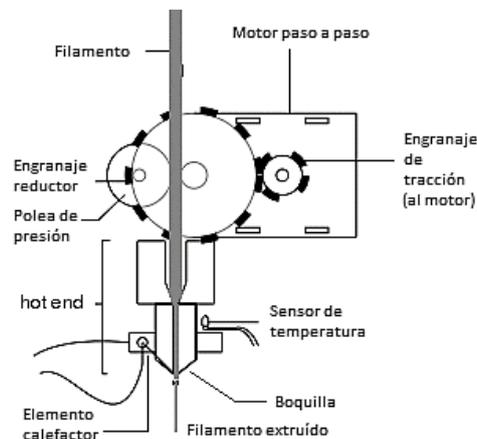


Figura 2. Funcionamiento del sistema de extrusión directa. **Fuente:** (Rodríguez J. , 2014).

2.6.2.1.1. Ventajas y desventajas del sistema de extrusión directa

Tabla 3. Ventajas y desventajas del sistema de extrusión directa.

Ventajas	Desventajas
Cabezal extrusor compacto y tamaño reducido.	Cabezal extrusor más pesado.

La presión sobre el filamento es constante.	Afecta al desplazamiento de los ejes X y Z.
Fácil comprobación de atascos y averías.	El motor disipa más potencia.
Cabezal desmontable.	

NOTA. Fuente: (Tofighi, 2015).

2.6.2.2. Extrusión con cable Bowden

En este sistema de extrusión el motor de empuje está alejado del extremo caliente, es decir, está colocado sobre la estructura de la impresora. Desde allí el motor empuja el filamento hacia la boquilla del extremo caliente por un tubo hueco de un material inextensible, llamado bowden (mecanismo que usan las bicicletas para llevar los cables de los frenos) (Rodríguez J. P., 2014).

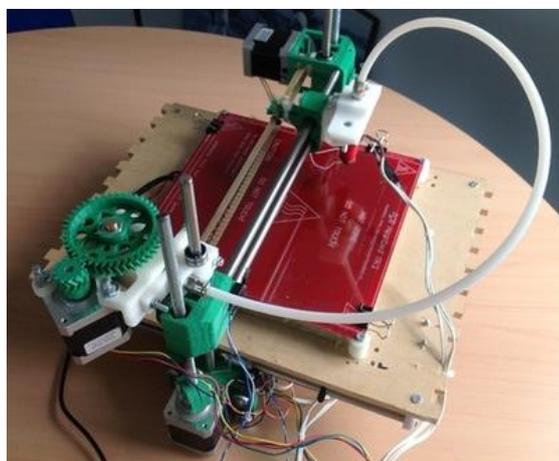


Figura 3. Funcionamiento del sistema de extrusión con cable bowden. **Fuente:** (Rodríguez J. , 2014).

2.6.2.2.1. Ventajas y desventajas del sistema de extrusión con cable bowden

Tabla 4. Ventajas y desventajas del sistema de extrusión con cable bowden.

Ventajas	Desventajas
Cabezal extrusor menos pesado.	Será más notorio el efecto stringing.
El carro se desplaza con menos dificultad.	Más posibilidad de atascos de material.
Se puede hacer impresiones más rápidas.	Sistema más complejo de ensamblar.

Se reducen las vibraciones en la impresión. Necesita mayor mantenimiento.

NOTA. Fuente: (Frax, 2015).

2.7. Tipos de extremos calientes

Existen una infinidad de hot ends o extremos calientes, dentro de los cuales se encuentran 3 grandes grupos, los extremos calientes tradicionales como el budashnozzle, los extremos calientes 100% metálicos y los extremos calientes unibody (3DByou, s.f.).

En ésta sección sólo se hablará de dos de los extrusores metálicos más populares y utilizados en el mercado, es decir el extremo caliente E3D y el extremo caliente hexagonal.

2.7.1. Extremo caliente E3D

Es un moderno extremo caliente diseñado por E3D. Puede trabajar con termoplásticos, nylon y policarbonato, tiene una longitud de 62mm. Trabaja con filamentos rígidos y flexibles de 1,75mm de diámetro. Se usa más como tipo Bowden (naylampmechatronics, s.f.).



Figura 4. Extremo caliente E3D tipo Bowden. **Fuente:** (naylampmechatronics, s.f.).

2.7.2. Extremo caliente tipo hexagonal

Es un extremo caliente completamente metálico, fabricado para trabajos de larga duración, no contiene partes de teflón, lo que permite temperaturas en la boquilla hasta 400°, a diferencia de los modelos convencionales que permiten hasta un máximo de 250°C. Se puede imprimir PLA, ABS, Nylon, laywood, laybrick, PVA, y casi cualquier tipo de filamento (Ferrer, makershop, 2014).



Figura 5. Extremo caliente hexagonal. **Fuente:** (Ferrer, makershop, 2014).

2.8. Servomotor DC

Es un motor síncrono con rotor de imanes permanentes que lleva incluido un sistema reductor y un sistema de control en lazo cerrado que utiliza una señal de retroalimentación para controlar la velocidad y posición. Los servomotores pueden rotar continuamente o pueden permanecer enclavados en una cierta posición mediante el control de ancho de pulsos (SchneiderElectric, 2007).



Figura 6. Servomotores DC. **Fuente:** (SchneiderElectric, 2007).

2.9. Motor a pasos

Es un dispositivo electromecánico que tiene la característica de poder moverse un paso a la vez de acuerdo al pulso que se le aplique, ideales para mecanismos que requieran de movimientos precisos, así como también controlar el sentido de giro y la velocidad. Los pasos pueden variar de $1,8^\circ$ a 90° . Además este motor puede permanecer enclavado en una posición o también puede permanecer libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas (López & Jaramillo Ceballos, 2015).



Figura 7. Motor a pasos. **Fuente:** (López & Jaramillo Ceballos, 2015).

2.9.1. Ventajas y desventajas de servomotores DC y motores a pasos.

Tabla 5. Ventajas y desventajas de servomotores DC y motores a pasos.

Ventajas	
Servomotores DC	Motor a pasos
Eficiencia del 80 al 90%.	Alta disponibilidad.
Estabilidad de velocidad, maneja altas velocidades y grandes aceleraciones.	Gran resolución con micropasos.
Gran precisión de posicionado.	Precisión en su movimiento.
Bajo momento de inercia.	Pueden quedar en una posición con el máximo torque.
Elevada respuesta dinámica.	Elevada respuesta dinámica.
Alta estabilidad de par.	Control más sencillo.
Generan menos ruido y menos calor	Menos propenso a sufrir daños mecánicos por sobretorques.
Desventajas	
Servomotores DC	Motor a pasos
Baja disponibilidad a nivel nacional.	Potencias pequeñas.
Alto costo	Resonancia a altas velocidades.
La conmutación depende de la resolución del encoder.	Genera ruido y vibraciones.

Sus escobillas deben ser cambiadas cada 2000 horas de trabajo.	No cuenta con un sistema en lazo cerrado.
No pueden permanecer en una posición con aplicación de fuerzas,	Velocidades bajas.
Propenso a daños mecánicos por sobretorques.	Poseen su mayor torque sólo a bajas velocidades.

Nota. Fuente: (Advanced Micro Controls, s.f.).

2.10. Sistemas de transmisión de potencia mecánica

El objetivo principal de un sistema de transmisión es transmitir la potencia y el movimiento generados por un motor. Los elementos mecánicos más utilizados para transmitir potencia y movimiento son: transmisión por banda, transmisión por cadena, transmisión piñón-engranaje, transmisión piñón-cremallera, tornillo sin fin, etc (Castro, 2012).

2.10.1. Transmisión por banda

Las bandas representan un tipo de elementos flexibles para transmisión de potencia. Están formadas por dos poleas, unidas a través de una banda o correa, con el objetivo de transmitir fuerzas y velocidades angulares entre los ejes paralelos (e-educativa.catedu.es, s.f.).



Figura 8. Transmisión por banda. **Fuente:** (Montes, 2014)

2.10.2. Transmisión por correa

La transmisión por cadena es similar a la transmisión por banda, en donde engranan los dientes de un piñón con los eslabones de una cadena (e-educativa.catedu.es, s.f.).



Figura 9. Transmisión por cadena. **Fuente:** (Montes, 2014)

2.10.3. Transmisión piñón-engranaje

Los engranajes son ruedas cilíndricas dentadas para transmitir potencia y movimiento de un eje giratorio a otro. Las transmisiones con engranes provocan un cambio de velocidad de salida del engrane en relación con el engrane de entrada que generalmente es un piñón. Los tipos de engranes son rectos, helicoidales, cónicos y sinfín-cremallera (Mott, 2006).

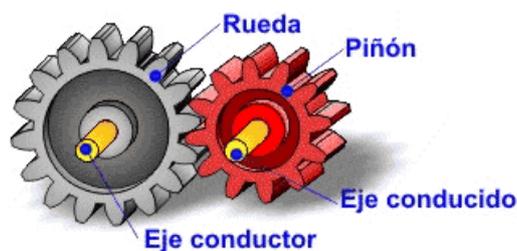


Figura 10. Transmisión piñón-engrane. **Fuente:** (e-educativa.catedu.es, s.f.).

2.10.4. Transmisión piñón-cremallera

Este sistema permite convertir un movimiento giratorio en movimiento lineal, o viceversa. Se utiliza mucho para conseguir movimientos lineales de precisión (Cejarosu, 2005).

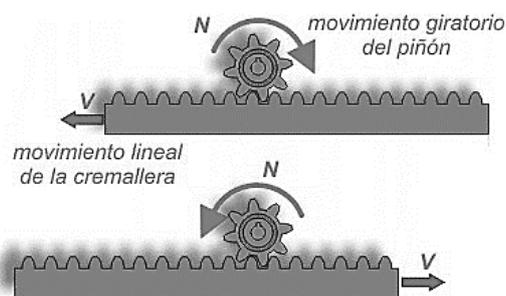


Figura 11. Transmisión Piñón-Cremallera. **Fuente:** (Cejarosu, 2005).

2.11. Sistemas de control

Un sistema de control es aquel que se caracteriza por la presencia de elementos que influyen en el funcionamiento de una planta o proceso. Por lo tanto el objetivo de un sistema de control es, mediante la manipulación de las variables de control, controlar las variables de salida, de modo que se pueda garantizar la estabilidad del sistema frente a perturbaciones y errores en los modelos. Los sistemas de control se clasifican en sistemas de control de lazo abierto y en sistemas de control de lazo cerrado (Miranda, 2012).

2.11.1. Sistema de control en lazo abierto

Un sistema de control en lazo abierto actúa sobre el proceso sin considerar el valor de la señal de salida, es decir que la salida no se utiliza como señal de retroalimentación. Por lo tanto para cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fijada anteriormente. Es el sistema de control más económico y sencillo. La figura 12 representa el esquema de un sistema de control en lazo abierto (Miranda, 2012).



Figura 12. Esquema de un sistema de control en lazo abierto. **Fuente:** (Miranda, 2012).

2.11.2. Sistema de control en lazo cerrado

En estos sistemas la señal de salida se relaciona con la señal de referencia obteniendo una señal de error, la señal de error obtenida entra al regulador o controlador para que éste actúe sobre la planta reduciendo el error y llevando la salida del sistema al valor deseado. La figura 13 muestra el esquema de un sistema en lazo cerrado (Miranda, 2012).

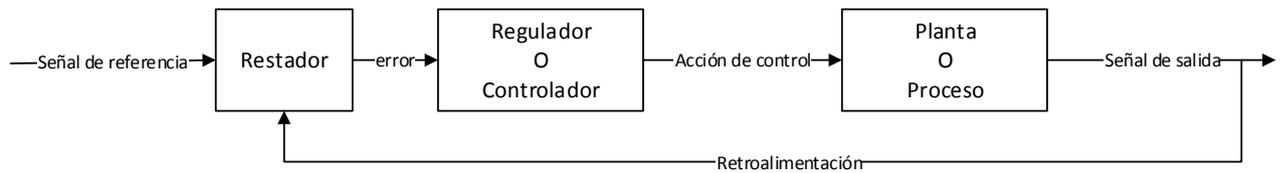


Figura 13. Esquema de un sistema de control en lazo cerrado. **Fuente:** (Miranda, 2012).

2.12. Tarjeta Azteeg X3 PRO

El Azteeg X3 Pro es una tarjeta controladora de impresora 3D con soporte hasta 8 controladores para motores a pasos y hasta 5 extrusores. Utiliza un controlador Atmel ATMEGA2560 compatible con los firmwares populares como Marlin y Repetier (PanucattDevices, 2017).

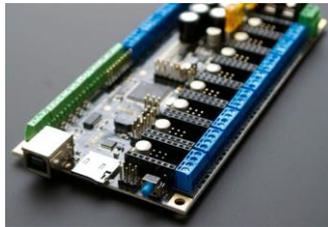


Figura 14. Tarjeta controladora Azteeg X3 PRO. **Fuente:** (PanucattDevices, 2017).

2.13. Tarjeta Duet Ethernet

La Duet es una tarjeta controladora para impresora 3D, combina el potente procesador de 32 bits “Atmel SAM4E8E ARM”, controladores paso a paso super silenciosos “TMC2660”. Ésta placa se complementa con una placa de expansión adicional la cual contiene otros 5 controladores de motor paso a paso para poder trabajar con un total de 7 extrusores. En la Figura 15 se puede apreciar a la tarjeta controladora Duet Ethernet (Filastruder, 2018). Para ver todas las características y diagramas de conexión de la tarjeta controladora Duet Ethernet y su tarjeta de expansión Duex5, ver Anexo 5.



Figura 15. Tarjeta controladora Duet Ethernet. **Fuente:** (Filastruder, 2018).

2.14. Plataforma Caliente

La plataforma caliente o también llamada cama caliente o Hot bed es la superficie sobre la cual se realiza la impresión, al ser calentada uniformemente por toda la superficie, ésta permite una mejor adherencia por parte del material a imprimir, principalmente el ABS, mejorando la calidad de impresión y evitando deformaciones del material como el warping.

2.15. Niquelinas Eléctricas

Son elementos fabricados a base de cobre-níquel, donde la energía eléctrica se transforma en calor: (Viloria, 2003).

Características:

- Tiene una resistividad de $0,49 \Omega * mm^2 * m$.
- Su temperatura límite es de $500^{\circ}C$.
- La cantidad de calor desprendido de una resistencia es directamente proporcional al cuadrado de la corriente, al valor de la resistencia y al tiempo (Viloria, 2003).



Figura 16. Niquelina eléctrica. **Fuente:** (Viloria, 2003).

2.16. Placa PCB FR4

La placa PCB FR4 es una PCB (tarjeta de circuito impreso) fabricada de FR4 (resina epoxi/fibra de vidrio) óptima para impresiones en 3D, su función es la de mantener la superficie de impresión a una temperatura aproximada de 50 hasta 100°C (SainSmart, 2017).

Características:

- Dimensiones de 214mm*214mm.
- Entrada de energía 12V o 24V.
- Resistencia entre 1.0 y 1.2 Ω .



Figura 17. Base caliente tipo PCB FR4. **Fuente:** (SainSmart, 2017).

2.17. Calentador de silicona

Es una base caliente de caucho de silicona reforzada con fibra de vidrio, son los calentadores flexibles más utilizados y están disponibles en diferentes geometrías. Proporcionan una transferencia de calor uniforme altamente eficiente en los rangos de temperatura de 50°C a 260°C (keenovo, 2017).

Características:

- Transferencia de calor uniforme y rápido.
- Resistencia a la humedad y productos químicos.
- Flexibles.
- Se adhiere a todas las superficies.



Figura 18. Base caliente fabricada de siliona. **Fuente:** (keenovo, 2017).

2.18. PanelDue

Es un panel de control gráfico táctil a todo color para impresoras 3D. Funciona con componentes electrónicos de impresoras 3D compatibles con el respectivo firmware y para comunicación serial (Crocker, 2017).

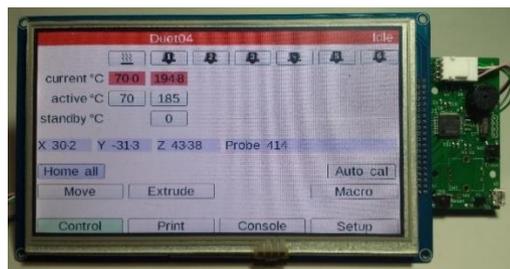


Figura 19. Panel táctil PanelDue de 7 pulgadas. **Fuente:** (Crocker, 2017).

2.19. Código G

El código G es un lenguaje de programación utilizado en control numérico (CN), usado en automatización, formando parte de la ingeniería asistida por computadora. En general, un código G, es el conjunto de funciones denominadas preparatorias, ya que controlan el modo en que la maquina va a realizar un trazado, o el modo en que va a desplazarse sobre la superficie

de la pieza que se está trabajando. Los valores que toman estos códigos van desde 00 hasta 99, donde cada uno tiene una función determinada (R-Luis, 2017).

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. Pasos para el diseño

Los pasos que se seguirán en el desarrollo de este capítulo se enumeran a continuación:

- Requisitos funcionales
- Requisitos de diseño
- Selección de alternativas
- Diseño mecánico
- Simulación
- Configuración de parámetros en el firmware
- Pruebas de funcionamiento

3.2. Requisitos Funcionales

Este proyecto tiene como objetivo implementar un sistema de movimiento giratorio y selección de cuatro extrusores para una impresora 3D.

Funciones que debe realizar el sistema multiextrusor:

- Movimiento giratorio para la posición de cada cabezal extrusor.
- Acarrear o transportar el filamento sólido de termo polímero hacia cada fundidor.
- Calentar el/los termo polímeros hasta que alcancen la temperatura de fundición de acuerdo al material seleccionado.
- Calentar la plataforma caliente.
- Extruir termo polímeros como PLA, ABS, TPU, etc.
- Permitir el posicionamiento manual de cada cabezal extrusor.
- Leer memorias externas MicroSD.
- Permitir la configuración de datos de temperatura, velocidad de extrusión y posición de los extrusores.

3.3. Requisitos de diseño

Se establecen los parámetros tomando como base a las especificaciones establecidas.

Tabla 6. *Requisitos de diseño de la impresora 3D multiextrusor.*

PARÁMETROS	
Alimentación de la máquina	110V AC
Dimensiones de la máquina	87cm*85cm*100cm (X, Y, Z)
Área de trabajo	El área de impresión será de 400mmx400mmx400mm.
Estructura mecánica	Estructura rígida que permita la estabilidad ante vibraciones.
Material de extrusión	Filamentos termoplásticos con diámetros de 1,75mm.
Tipo de software	El software para controlar la impresión 3D será Open Source.
Temperatura de trabajo	Componentes mecánicos y electrónicos adecuados para trabajar con altas temperaturas.
Otras características	Lector de memorias microSD, interfaz gráfica HMI, paro de emergencia, indicadores visuales.

3.4. Selección de alternativas

Para la selección de los componentes mecánicos y electrónicos se optó por realizar una calificación de alternativas mediante criterios de ponderación. En la Tabla 7 se especifica la forma de calificación junto con su respectiva ponderación e interpretación (Pérez, s.f.).

Tabla 7. *Criterios de ponderación para la selección de alternativas.*

Significado	Insatisfactorio	Satisfecho	Bueno	Muy Bueno	Óptimo
Calificación	0	1	2	3	4
Ponderación	<35%	36%-50%	51%-75%	76%-89%	90%-100%

Nota: Fuente: (Chancusi & Navarrete, 2014).

3.4.1. Selección del extremo caliente.

Para la selección del extremo caliente (Hot end) se tomó como referencia los modelos metálicos más comerciales y populares en la impresión 3D, es decir el modelo E3D y el tipo hexagonal. La Tabla 8 muestra los criterios para la selección del extremo caliente con su respectiva ponderación.

Tabla 8. Criterios de selección del extremo caliente.

Criterio	Modelo E3D	Tipo Hexagonal
Tipo de construcción	3	4
Disponibilidad	2	2
Costo	3	3
Tamaño	2	3
Disipación de calor	3	4
Fácil montaje	3	4
No atasco de material	2	3
SUMA	18	23

De acuerdo a la Tabla 8, se concluye que la opción más óptima es el extrusor metálico hexagonal, ya que tiene buenas características en cuanto al tipo de construcción del que está hecho, pues está fabricado de aluminio, acero inoxidable, latón, y no contiene partes de teflón, permitiendo trabajar a altas temperaturas de hasta los 300 °C, evitando que el filamento termoplástico se atasque, además es de reducido tamaño y de fácil montaje, haciéndolo más eficiente comparado con otros modelos.

3.4.1.1. Cartucho calentador

El cartucho calentador que es parte del extremo caliente seleccionado, está compuesto de un cartucho metálico y una resistencia cerámica de alta potencia, la cual calienta rápidamente el bloque del extrusor alcanzando altas temperaturas. Puede conservar la misma temperatura, obteniendo una impresión de buena calidad. El cartucho calentador es muy duradero y resistente a la rotura de los cables, ya que están recubiertos de silicona resistentes a altas temperaturas. Además el cartucho metálico es resistente y aprovecha todo el calor generado por la resistencia cerámica de alta potencia (filament2print, 2016).



Figura 20. Cartucho Calentador 12V-30W. **Fuente:** (filament2print, 2016).

3.4.1.2. Sensor de temperatura

El sensor de temperatura modelo EPCOS de 100k, también es parte del extremo caliente seleccionado, es un termistor con encapsulado de vidrio, y cables dumet (revestidos de cobre); es resistente al calor y altamente estable, capaz de realizar mediciones desde -55°C hasta 300°C , es sumamente pequeño y tiene una resistencia de $100\text{K } \Omega$, para ver las especificaciones técnicas, ver Anexo 6, (Mouser Electronics, 2017).



Figura 21. Termistor EPCOS 100K. **Fuente:** (Mouser Electronics, 2017).

3.4.2. Selección del tipo de extrusión

Las alternativas descritas en la Tabla 9 muestran los tipos de extrusión más apropiados para trabajar con termoplásticos como material de extrusión.

Tabla 9. *Criterios de selección del tipo de extrusión.*

Criterio	Extrusión Directa	Extrusión con cable bowden
Costo	2	1
Precisión	3	4
Velocidad de impresión	3	3
Fácil montaje	3	1
Presión de acarreo de material	4	2
Mantenimiento	3	2
SUMA	18	13

De acuerdo a la Tabla 9, se puede apreciar que la alternativa de tipo de extrusión directa es la mejor opción, de acuerdo a los criterios que se estableció anteriormente, ya que éste tipo de extrusión brinda un fácil montaje, una fácil comprobación de atascos o averías, además es un sistema no muy costoso.

3.4.3. Selección de motores

Para la selección de los motores tanto de los que forman parte de los cabezales extrusores como del movimiento del sistema multicabezal se tomó en cuenta los requerimientos de potencia del sistema a implementar, por lo tanto, sólo se considerará motores de corriente continua, es decir servomotores DC y motores a pasos. La tabla 10 muestra los criterios para selección del motor con su respectiva ponderación:

Tabla 10. *Criterios de selección del motor.*

Criterio	Servomotor DC	Motor a pasos
Disponibilidad	2	4
Costo	2	4
Velocidad	4	3
Torque	3	5
Potencia	4	3
Precisión	4	4
SUMA	19	23

De acuerdo a la tabla 10, se concluye que el motor a pasos es el más adecuado, por lo tanto se seleccionará los motores a pasos del tipo bipolares ya que éstos poseen las siguientes características:

- Los motores bipolares tienen aproximadamente 30% más de torque que los motores unipolares.
- Los motores bipolares permiten un posicionamiento con gran precisión.
- Tienen una gran resolución de micropasos.
- Pueden permanecer enclavados en una cierta posición con su máximo torque.
- Se puede implementar un control de micropasos más sencillo.
- Son menos propensos a sufrir daños mecánicos por sobretorques.
- No necesitan mucho mantenimiento.

3.4.3.1. Selección del motor para cada cabezal de extrusión

Teniendo en cuenta la viscosidad del filamento y de la geometría del fundidor, se procederá a calcular las caídas de presión en el extremo caliente, es decir la potencia necesaria en el sistema de acarreo, para que la fuerza aplicada al filamento sea mayor a la presión ejercida en la boquilla (Chancusi & Navarrete, 2014).

Debido a que el material fundido se adhiere a las paredes del fundidor, el flujo está sometido a un esfuerzo cortante; de tal manera que la caída de presión total será igual a la suma de la caída de presión en la entrada y la caída de presión en la boquilla (Michaeli, 1992).

Además se tomará en cuenta al flujo como isotérmico (temperatura constante) e hidrodinámico (velocidad constante a lo largo del canal), además se considerará al filamento como un fluido newtoniano (viscosidad constante) el cuál fluye constantemente independientemente del tiempo (Michaeli, 1992).

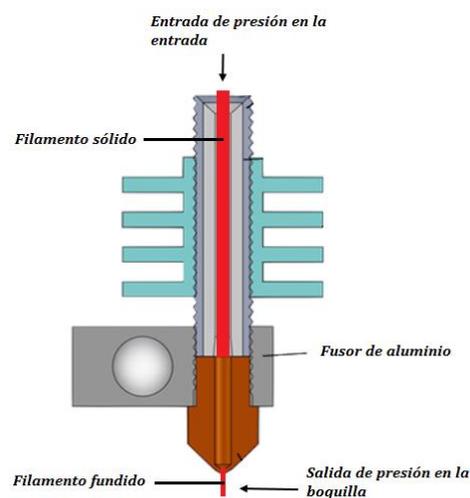


Figura 22. Elementos del extremo caliente o fundidor. **Fuente:** (Wood, 2015).

La caída de presión total será:

$$\Delta P_T = \Delta P_e + \Delta P_b \quad (1)$$

Donde:

- ΔP_T : caída de presión total.
- ΔP_e : caída de presión en la entrada.
- ΔP_b : caída de presión en la boquilla.

Se calcula la caída de presión tanto en la entrada del extremo caliente como en la boquilla siguiendo el proceso realizado por (Michaeli, 1992).

$$\Delta P = \frac{8 * v * L * \eta}{R^2} \quad (2)$$

Donde:

- ΔP : Caída de presión
- η : Viscosidad del material
- R : Radio del fundidor
- L : Longitud del fundidor
- v : velocidad del polímero

Posteriormente se reemplaza los datos del extremo caliente seleccionado en la ecuación (2).

- $L1$: Longitud del fundidor = 43.49mm=0.04349m (Anexo 7)
- $R1$: Radio del fundidor = 1mm=0.001m
- v : velocidad del polímero = 50mm/s=0.05m/s (tomado por medición)
- $L2$: altura de la boquilla = 12mm=0.012m (Anexo 7)
- $R2$: Radio de la boquilla= 0.2mm=0.0002m
- η : Viscosidad para termopolímeros fundidos = 10^3 Pa.s (uniovi, s.f.).

$$\Delta P_e = \frac{8 * (0.05m/s) * (0.04349m) * (10^3 \frac{N}{m^2} \cdot s)}{(0.001m)^2} = 1.74 * 10^7 Pa \quad Ref(2)$$

$$\Delta P_b = \frac{8 * (0.05m/s) * (0.012m) * (10^3 Pa \cdot s)}{(0.0002m)^2} = 1.2 * 10^8 Pa \quad Ref(2)$$

$$\Delta P_T = \Delta P_e + \Delta P_b = 1.74 * 10^7 Pa + 1.2 * 10^8 Pa = 1.374 * 10^8 Pa \quad Ref(2)$$

Se determina la fuerza que necesita el filamento en la entrada mediante la ecuación (3).

$$F = \Delta P_T * A \quad (3)$$

Donde:

- F : Fuerza necesaria
- A : Área de la sección circular de radio $R2$ (radio de la boquilla).

$$F = 1.374 * 10^8 Pa * \pi * (0.0002m)^2 = 17.266N \quad \text{Ref(3)}$$

El torque necesario T que debe aplicar el motor para acarrear el filamento y posteriormente extruirlo, se calcula con la ecuación (4), en donde $r = 5.6mm$ es el radio aproximado del engrane que se acoplará con el eje del motor.

$$T = F * r \quad (4)$$

$$T = 17.266N * 0.0056m = 0.097N.m \quad \text{Ref(4)}$$

Por lo tanto se toma en cuenta el torque que debe aplicar el motor, y se selecciona el motor de acuerdo a la aplicación requerida que se encuentra en la Tabla 11.

Tabla 11. Motores a pasos Nema comunes para aplicaciones de control numérico e impresión 3D.

Tipo de Motor Nema	Torque
Motor Nema 17	Aplicaciones que no requieren mayor torque (0,56 N.m).
Motor Nema 23	Aplicaciones que requieren de torque moderado (2,68 N.m).
Motor Nema 34	Aplicaciones que requieren mayor torque (12,07 N.m).

Nota. Fuente: (National Instruments, 2014).

De acuerdo al torque requerido por parte del motor para el acarreo del material, se elige el motor Nema 17 (Tabla 11), el cual tiene un torque de 0,5 N.m, cubriendo el torque mínimo calculado de 0,097 N.m. La Tabla 12 muestra las características del motor seleccionado.

Tabla 12. Características del motor Nema 17.

Características	Nema 17
Torque	0,56N.m
Corriente nominal	1,5A
Voltaje nominal	2,8 V
Ángulo de Paso	1,8°

Número de pasos (paso completo)	200
Micropasos (1/16 paso)	3200
Fases	2
Resistencia por bobina	2,8 Ω
Peso	0,365 kg

Nota. Fuente: (National Instruments, 2014).

La potencia disipada por el motor Nema 17 se calcula con la ecuación (5) (Hoffmann, 2004).

$$P = I^2 * R \quad (5)$$

Donde:

P: Potencia del motor

I: Corriente nominal del motor

R: Resistencia de la bobina del motor

Por lo tanto la potencia del motor Nema 17 es:

$$P = (1,5A)^2 * (2,8\Omega) = 6,3W \quad Ref(5)$$

Para complementar el montaje del cabezal extrusor, una vez seleccionado el tipo de extrusión directo y el motor Nema 17 para el acarreo, se procede a seleccionar el mecanismo que ayudará al guiado y al transporte del material, es decir se tomará en cuenta los mecanismos existentes en el mercado y se seleccionará el mecanismo MK8, además de que es uno de los más comunes y sencillo, se acopla fácilmente con el motor Nema 17, y es muy barato comparado con otros mecanismos. Está conformado por una rueda dentada que va acoplada al eje del motor Nema 17 y un rodamiento, permitiendo una buena tracción del material evitando resbalamientos. (amazon, 2017).



Figura 23. Mecanismo MK8. **Fuente:** (amazon, 2017)

En la Tabla 13 se enlistan los pesos de cada elemento del que forman parte cada cabezal extrusor.

Tabla 13. *Peso del Cabezal Extrusor.*

Elemento	Masa (kg)	Peso (N)
Motor	0.3	2.943
Extrusor	0.01	0.0981
Mk8	0.136	1.334
Ventilador	0.10	0.981
Total	0.546	5.356

3.5. Diseño del cabezal multiextrusor

Requerimientos para el diseño del cabezal multiextrusor

- Manejar 4 extrusores.
- Sistema de selección de extrusores mediante movimiento giratorio.
- Sistema liviano.
- Adaptable al sistema de movimiento en X, Y, Z.
- Fácil ensamblaje y mantenimiento.
- Fabricado con materiales resistentes.

3.5.1. Distribución geométrica de los cabezales extrusores

Según el requerimiento de diseño de un sistema giratorio, se diseñará un plato circular en el que irán ubicados los cabezales extrusores, tomando en cuenta:

- La longitud total del cabezal extrusor, desde la entrada del extrusor hasta la boquilla.
- Una distancia de seguridad desde el centro del plato circular, en la que se ubicará el sistema de transmisión, es decir se ubicarán los motores de los cabezales extrusores a una distancia de seguridad de 52mm del centro del plato circular.
- Los motores de los cabezales extrusores deberán ir separados entre sí un cierto ángulo ya que el plato circular deberá tener una distribución uniforme de pesos; por lo tanto, se divide los 360° para 5 partes iguales, es decir un ángulo de 72° , ya que son cuatro los cabezales extrusores, y el quinto elemento es para la disposición de todo el cableado eléctrico de los cabezales extrusores.

Las dimensiones del plato se especifican en el correspondiente plano en ANEXOS DE PLANOS MECÁNICOS.

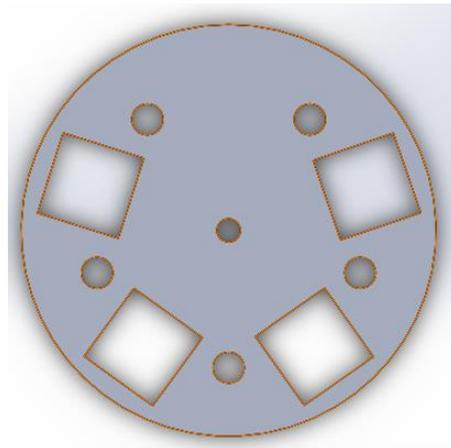


Figura 24. Geometría del plato circular.

3.5.2. Selección del material del plato circular

El material con el que debe ser fabricado el plato circular deberá ser, resistente, no corrosivo y liviano, por lo tanto se selecciona el aluminio 6061 TS, ver Anexo 8.

3.5.3. Movimiento del cabezal multiextrusor

Para la generación del movimiento del plato del cabezal multiextrusor se utilizará un sistema de transmisión de movimiento de tipo piñón-engrane (reductor), ya que este sistema permite aumentar el torque y reducir la velocidad, utilizando un motor lo más pequeño posible. Por lo tanto se procede a calcular el torque necesario que deberá poseer el motor del multicabezal para mover el plato.

3.5.3.1. Cálculo del torque necesario para el movimiento del plato

Para poder encontrar el torque necesario que deberá aplicar el motor y vencer la inercia del plato y poder moverlo, se considerará al plato como un disco que tiene un momento de inercia. Ya que los cabezales extrusores junto con el correspondiente cableado eléctrico estarán distribuidos uniformemente en el plato; la masa total del plato será igual a la suma de las masas del material del plato, los cabezales extrusores y la masa del cableado eléctrico del sistema multiextrusor.

$$m_p = m_{Al} + 5 * m_E = 3,23 \text{ kg} \quad (6)$$

Donde:

- m_p = masa total del plato
- m_{Al} = masa del material del plato (aluminio)
- m_E = masa de todo un cabezal extrusor

$$m_p = 0,5\text{kg} + 5(0,546\text{kg}) = 3,23 \text{ kg} \quad \text{Ref}(6)$$

El momento de inercia que posee un disco rígido, con respecto a un eje perpendicular al plano y que pasa por su centro, según (Beer, Russell Johnston, & Clausen, 2007) se calcula mediante la ecuación 7.

$$I = \frac{m_p * R^2}{2} = \frac{3,23kg * (0,105m)^2}{2} \quad (7)$$

$$I = 0,018 kg * m^2$$

Donde:

- R = radio del plato igual a 10,5cm = 0,105m

Al considerarse que a la salida de la transmisión de movimiento se necesita un mayor torque que a la entrada, el plato no deberá moverse a velocidades tan altas, es decir el plato deberá moverse a velocidades intermedias, evitando así que el motor pierda pasos, o que se produzca algún atascamiento en la parte de engranes. Por lo tanto se requerirá que el plato gire aproximadamente a 300rev/min, la cual se considera como una velocidad intermedia.

El movimiento del plato al tener una aceleración, se procederá a calcular su aceleración angular, mediante la ecuación del movimiento circular uniformemente acelerado:

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2 * \alpha * \theta \quad (8)$$

Donde:

- ω^2 = velocidad angular final del plato = 480rev/min = 50,27 rad/s
- ω_0^2 = velocidad angular inicial del plato = 0 rad/s
- α = aceleración angular del plato
- θ = desplazamiento angular de un cabezal extrusor = $72^\circ(3) = 216^\circ = 3,77$ rad

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\theta} \quad \text{Ref}(8)$$

$$\alpha = \frac{(50,27)^2 rad^2}{2(3,77 rad)} = 335,16 rad/s^2$$

Una vez obtenida la aceleración angular se procede a calcular el torque en la salida del sistema de transmisión, mediante la fórmula (9) de la segunda ley de Newton para el movimiento de rotación, según (Tippens, 2011).

$$T = I * \alpha \quad (9)$$

Donde:

- T_2 = Torque aplicado en el eje de rotación del plato
- I = momento de inercia del plato = $0,018 \text{ kg} * \text{m}^2$
- α = Aceleración angular = $335,16 \text{ rad/s}^2$

$$T_2 = 0,018 \text{ kg} * \text{m}^2 \left(335,16 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right) = 6,03 \text{ N} * \text{m} \quad \text{Ref(9)}$$

3.5.4. Diseño del sistema de transmisión engrane-piñón

Para el diseño de la transmisión engrane-piñón se toma como dato de referencia, el cálculo del torque necesario para el movimiento del plato, es decir $6,03 \text{ N} * \text{m}$ obtenido anteriormente. Por criterio de diseñador, la relación a aplicar será de 1 a 4, ya que se necesita reducir la velocidad y aumentar el torque, por lo tanto el torque a la entrada del sistema se calcula mediante la fórmula (10).

$$T_1 = \frac{6,03 \text{ N} * \text{m}}{4} = 1,5075 \text{ N} * \text{m} \quad (10)$$

Siguiendo el proceso de (Casillas, 1997), se va a diseñar un par de engranes para transmitir movimiento, desde un piñón fijo al eje del motor del multicabezal, hacia un engrane empotrado en el plato. Por facilidad de fabricación y manera silenciosa de trabajar se usará un perfil de involuta de 20° a profundidad completa. Ya que existirá aumento de torque y una reducción de velocidad, la velocidad angular de la salida $\omega_p = 201,06 \text{ rad/s}$, la velocidad angular de la entrada $\omega_e = 50,27 \text{ rad/s}$ y por criterio de diseñador, el número de dientes del piñón $Z_p =$

10, número de dientes del engrane $Z_e = 40$ y el módulo $m = 1,5$. Con los datos obtenidos se determinan los diámetros primitivos (d_p), según la fórmula (11):

$$d_p = Z * m \quad (11)$$

$$d_{pp} = Z_p * m = 10mm(1,5) = 0,015m \quad Ref(11)$$

$$d_{pe} = Z_e * m = 40mm(1,5) = 0,06m \quad Ref(11)$$

Con los diámetros primitivos se encuentra el diámetro entre centros mediante la fórmula (12):

$$d_c = \frac{d_{pp} + d_{pe}}{2} = \frac{0,015m + 0,06m}{2} = 0,038m \quad (12)$$

Resistencia del diente

Con el número de revoluciones del piñón $n_p = 1920 \text{ rev/min}$ y el número de revoluciones del engrane $n_e = 480 \text{ rev/min}$, se determina la velocidad periférica lineal en el diámetro primitivo con la fórmula (13):

$$V = \frac{d_p * Z * n}{60} \quad (13)$$

$$V_p = \frac{d_{pp} * Z_p * n_p}{60} = \frac{0,015m * 10 * 1920 \text{ rev/min}}{60} = 4,8m/s \quad Ref(13)$$

$$V_e = \frac{d_{pe} * Z_e * n_e}{60} = \frac{0,06m * 40 * 480 \text{ rev/min}}{60} = 19,2m/s \quad Ref(13)$$

Posteriormente, se calcula la fuerza F a transmitir en caballos de vapor, mediante la fórmula (14):

$$F = \frac{T * \omega}{735 W \frac{s}{kg * m}} \quad (14)$$

$$F_p = \frac{6,03N \cdot m * 50,27 \text{ rad/s}}{735W \frac{s}{kg * m}} = 0,412 \text{ kg} * m/s \quad \text{Ref(14)}$$

$$F_e = \frac{1,5N \cdot m * 201,06 \text{ rad/s}}{735 W \frac{s}{kg * m}} = 0,412 \text{ kg} * m/s \quad \text{Ref(14)}$$

Se calcula la presión o esfuerzo tangencial para el diente con la fórmula (15):

$$P = \frac{75 * F}{V} \quad (15)$$

$$P_p = \frac{75 * 0,412 \text{ Kg} * m/s}{4,8 \text{ m/s}} = 6,43 \text{ kg} \quad \text{Ref(15)}$$

$$P_e = \frac{75 * 0,412 \text{ kg} * m/s}{19,2 \text{ m/s}} = 1,61 \text{ kg} \quad \text{Ref(15)}$$

Se encuentra la carga de seguridad o coeficiente de trabajo por flexión mediante la fórmula (16):

$$C = \frac{P}{m^2 * 1,52} \quad (16)$$

$$C_p = \frac{6,43 \text{ Kg}}{(1,5 \text{ mm})^2 * 1,52} = 1,88 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{Ref(16)}$$

$$C_e = \frac{1,61 \text{ Kg}}{(1,5 \text{ mm})^2 * 1,52} = 0,47 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{Ref(16)}$$

Finalmente se procede a seleccionar en la tabla 14 el material idóneo para fabricar los engranes de acuerdo al coeficiente de trabajo obtenido.

Tabla 14. Tabla de coeficientes de trabajo a la flexión.

Materiales	C= kg*mm²
Fundición 18 a 19 kg*mm ²	4-5

Acero moldeado	9-10
Acero al carbono	
C=0,15-0,25%	14-27
C=0,40-0,50%	24-27
Acero al cromo níquel	
Ni=3,25-3,75%	27-31
Acero al níquel	
Cr=0,45 Ni=1%	24-28
Cr=0,75 Ni=1,5%	31-42
Bronce fosforoso	5-6
Duraluminio	10
Cuproaluminio	16
Aluminio	3
Materiales plásticos, fenolita, etc...	1,5

Valores C, basados en los límites de elasticidad de los diversos materiales a emplear, y están comprendidos entre 70 a 80 % de la resistencia a la tracción.

Nota: Fuente: (Casillas, 1997).

Según el resultado obtenido de $C=1,88$ en el piñón, se puede observar en la tabla 14 que el material plástico no sería el adecuado ya que sobrepasa el valor del coeficiente de trabajo, por lo tanto se selecciona el aluminio, siendo un material muy resistente y liviano, realizará un trabajo ideal para la máquina. Además para seleccionar el material para el engrane, $C=0,47$, se puede observar en la tabla 14 que el material plástico sería suficiente para su fabricación, pero se optó por seleccionar el aluminio para facilitar el trabajo con el piñón.

3.5.4.1. Selección de rodamientos

Se selecciona mediante catálogo los rodamientos 6201; ya que de acuerdo a sus dimensiones se acopla fácilmente al engrane, además de que puede soportar tranquilamente la carga dinámica del plato y del engrane, ver Anexo 9.

3.5.5. Selección del motor para el movimiento del sistema multicabezal

Conociendo el dato del torque necesario en la entrada del sistema de transmisión de 1,5075 N.m, se selecciona un motor Nema23 de 1,9 N.m, cubriendo el torque requerido. Ver Anexo 10.

3.5.6. Diseño del eje del cabezal multiextrusor

Requerimientos para el diseño del eje del cabezal multicabezal

- Diámetro del eje de la placa igual a 12mm (Rodamiento 6201).
- Fabricación de material liviano y resistente.

3.5.6.1. Diseño mediante cálculo analítico

El diseño del eje que sostendrá el plato del cabezal multiextrusor, se realizó mediante cálculos analíticos y su comprobación mediante un software de simulación.

Análisis de la carga a la que se encuentra sometida el eje

El eje de 38mm de longitud va a estar sometido a una carga puntual de 32N, correspondiente al peso del cabezal multiextrusor completo.

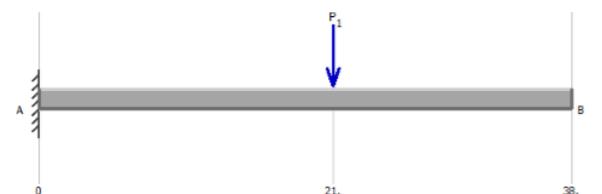


Figura 25. Análisis de la carga en el eje de la placa.

Con la ayuda de un software de simulación, se obtiene la fuerza cortante máxima y el momento flector.

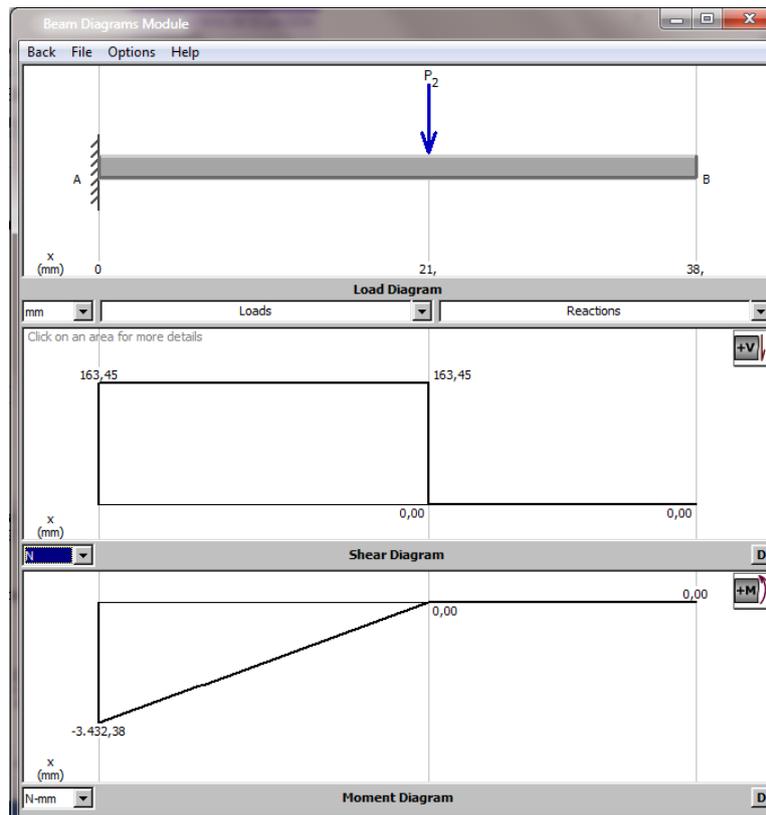


Figura 26. Análisis de la fuerza cortante máxima y el momento flector máximo.

Obteniendo los siguientes resultados:

Fuerza cortante máxima = 163.45N

Momento flector máximo = 3432.38 N
.mm

Cálculo del mayor esfuerzo que sufre el eje debido a la flexión

El mayor esfuerzo que sufre el eje debido a flexión se calculará con la formula (17) según (Budynas & Nisbett, 2008).

$$\sigma = \frac{M}{S} \quad (17)$$

Donde:

- σ = esfuerzo a flexión
- M = momento flector
- S = módulo de sección

Para calcular el módulo de sección se utilizará la fórmula (18) según (L. Mott, 2004).

$$S = 0,024(D_E^3 - D_I^3) \quad (18)$$

Donde:

D_E = diámetro externo de la sección

D_I = diámetro interno de la sección

$$S = 0,024(13^3 - 0^3) = 52.72mm^3 \quad Ref(18)$$

Y se calcula el esfuerzo

$$\sigma = \frac{3432.38N \cdot mm}{52.72mm^3} = 65.10MPa \quad Ref(17)$$

Finalmente se calcula el factor de seguridad mediante la fórmula (19) según (L. Mott, 2004); y con referencia al límite elástico de la aleación del aluminio 6061T6 ($S_y = 270MPa$).

$$N = \frac{S_y}{\sigma} \quad (19)$$

$$N = \frac{270 \text{ Mpa}}{65.1 \text{ Mpa}} = 4.22 \quad Ref(18)$$

3.5.6.2. Diseño del eje mediante cálculo de elementos finitos

Para validar el factor de seguridad obtenido analíticamente, se simuló mediante el software SolidWorks a través del método de elementos finitos.

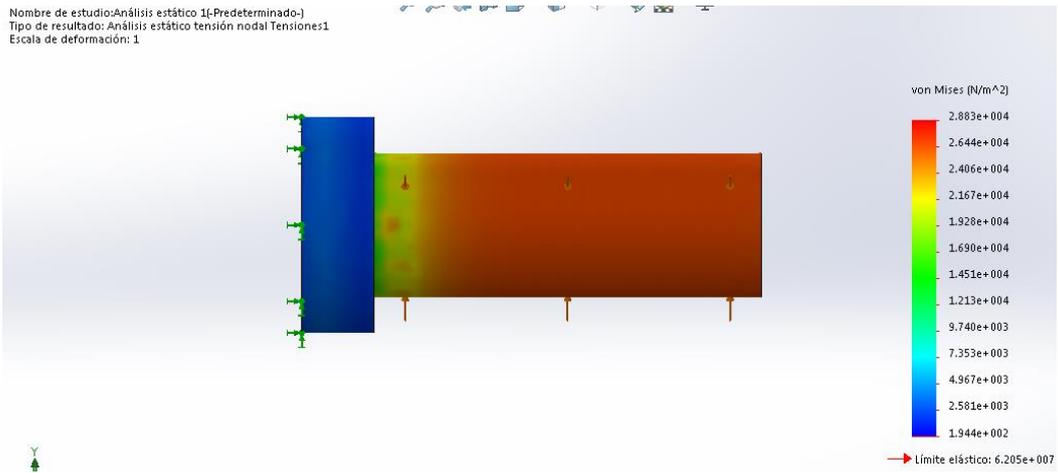


Figura 27. Deformación unitaria del eje.

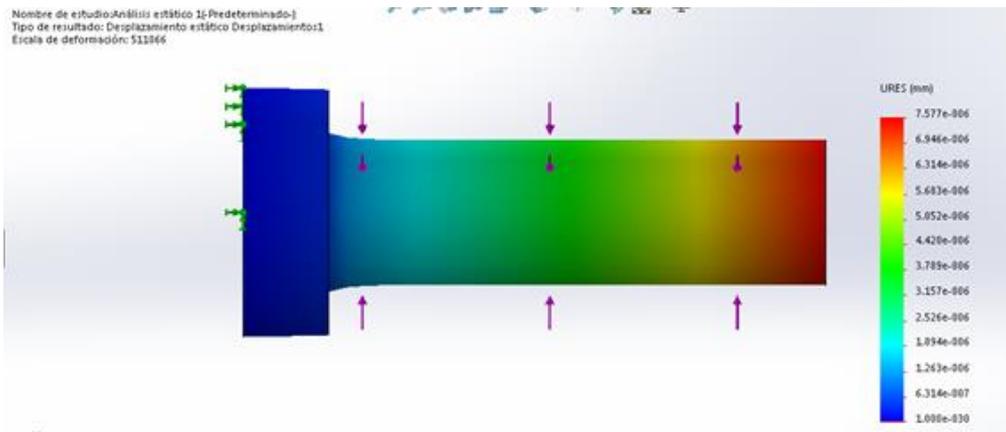


Figura 28. Desplazamiento del eje en el eje de las abscisas.

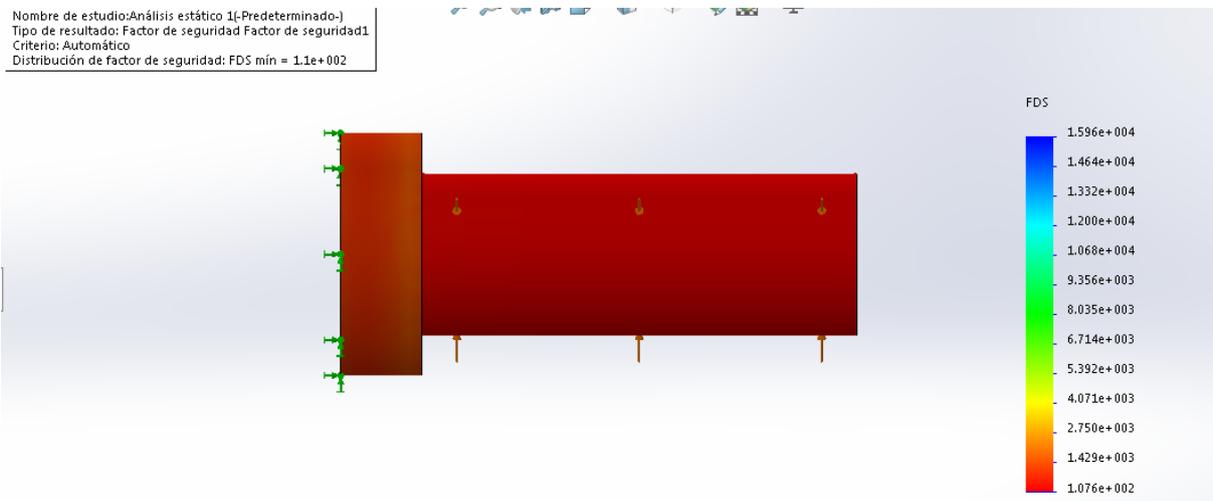


Figura 29. Factor de seguridad.

Datos obtenidos:

Límite elástico = 23,87N/m²

Desplazamiento = 14,57mm

Factor de seguridad = 5,1

Finalmente se comprobó que el factor de seguridad calculado analíticamente si se aproxima al calculado en la simulación, asegurando que la simulación mediante elementos finitos es correcta, validando el modelo.

3.5.7. Sujetadores

En la sujeción de los componentes del sistema del cabezal multiextrusor se utilizará pernos avellanados con tuerca y tornillos con tuerca. La carga cortante máxima es 70N equivalente al peso total del cabezal multiextrusor, donde la selección de sujetadores se realizó mediante catálogo de acuerdo a la capacidad de la carga cortante máxima, ver Anexo 11.

3.6. Electrónica

En la parte electrónica se encuentran todos los elementos electrónicos que permitirán controlar el correcto funcionamiento del sistema multiextrusor y de toda la impresora 3D. En este caso se procede a seleccionar y utilizar una tarjeta electrónica de software libre ya fabricada existente en el mercado, que cumpla con todos los requerimientos y funciones que se requiere para el control de la máquina. Por lo tanto se han considerado dos alternativas: la tarjeta Azteeg X3 Pro y la tarjeta DUET 0.8.5. En la siguiente tabla se muestran los criterios para la selección de la mejor opción.

Tabla 15. Criterios de selección tarjeta controladora.

Criterio	Tarjeta Azteeg X3 Pro	Tarjeta DUET 0.8.5
Controladores	2	3

Termistores	3	3
Finales de carrera	3	3
Protecciones	3	3
Montaje	3	3
Otras características	2	3
Costo	2	3
Total	18	21

De acuerdo a la tabla 15, se puede concluir que la mejor opción a seleccionar es la tarjeta DUET 0.8.5, ya que a través de su tarjeta de expansión, brinda controladores de hasta 5 extrusores, necesarios para el control del sistema multicabezal y controladores para la generación de movimiento de la máquina en sus 3 ejes. Además es compatible con cualquier firmware y se puede comunicar serialmente con una interfaz gráfica, necesaria para el control manual de la máquina.

Para el control de los motores a pasos de los extrusores se ha seleccionado el controlador DRV8825 (Anexo 12) debido a que es compatible con la tarjeta seleccionada anteriormente, entre sus características se encuentran:

- Interfaz de control de paso y dirección imple.
- Seis diferentes resoluciones de pasos: paso completo, medio paso, $\frac{1}{4}$ de paso, $\frac{1}{8}$ de paso, $\frac{1}{16}$ de paso y $\frac{1}{32}$ de paso.
- Con un potenciómetro le permite ajustar la salida de corriente máxima.
- Puede trabajar con 3,3V y 5V.
- Posee protección contra cortocircuitos, apagado térmico por sobre temperatura, apagado por sobre corriente y bloqueo por bajo voltaje (PololoCorporation, 2017).

3.6.1. Selección de la plataforma caliente

Para la selección de la plataforma caliente (cama caliente) se han dispuesto las alternativas: niquelinas eléctricas, la base PCB FR4 y la base de caucho de silicona; por lo tanto para seleccionar la mejor opción, se evaluó ponderando los criterios que se indican en la tabla 17.

Tabla 16. Criterios de selección plataforma caliente.

Criterio	Niquelinas	Base PCB	Base de caucho de
	Eléctricas	FR4	silicona
Costo	4	3	2
Tamaño	3	3	2
Peso	2	2	4
Montaje	1	2	3
Uniformidad del calor	2	3	3
SUMA	12	13	14

Como se puede observar en la tabla 16, la mejor opción a seleccionar es la Base caliente de caucho de silicona, ya que ésta posee una transferencia de calor rápida y uniforme en toda la superficie, al contrario de la base caliente PCB FR4, la cual se tendría que conectar con otras 3 bases calientes para conseguir el área de trabajo establecido anteriormente, y además de que se tendría que implementar un sistema de potencia.

3.6.2. Selección de la fuente para el sistema de acarreo

Al contar con 4 motores nema 17 para el sistema de acarreo, se tiene una corriente por motor de 1,5A, además se toma en cuenta la carga de los cuatro ventiladores equivalente a 4A, obteniendo una carga total de 10A, por lo tanto se selecciona una fuente de 12V a 12A.

3.6.3. Selección de la fuente para los calentadores

Teniendo en cuenta los 4 calentadores de cada cabezal extrusor, se tiene una corriente de 2,5A por cada calentador, obteniendo una carga eléctrica total de 10A, seleccionando una fuente de 12V a 12^a.

3.6.4. Selección del cableado

Para que el cableado soporte el flujo de corriente sin sufrir recalentamientos, se selecciona para los calentadores el cable número 16 con filamentos de 1,4mm de diámetro, el cual tiene una capacidad máxima de corriente de 11^a, potencia máxima de 264W.

3.7. Nivelación de la plataforma caliente

Con la plataforma de caucho de silicona seleccionada, se utilizará y se adaptará a una base rectangular de vidrio templado, proporcionando una superficie plana y rígida. Por lo tanto se mantendrá aislada toda la plataforma de caucho de silicona hacia abajo, permitiendo la conducción de calor hacia arriba, además se nivelará la cama ubicando resortes de regulación en las 4 esquinas correspondientes a una base metálica de aluminio.

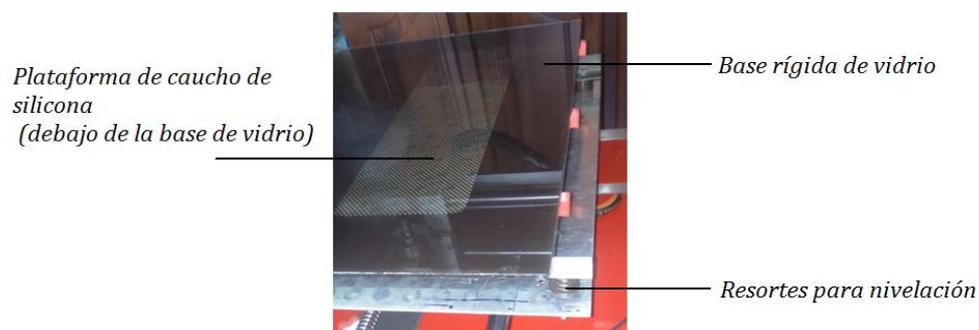


Figura 30. Sistema de nivelación de la plataforma caliente a través de resortes.

3.8 Control de la impresora 3D

El sistema de control funciona a través de un software (open source) que envía información a la tarjeta de control Duet, los drivers reciben las señales y controlan los motores, mientras que los sensores de temperatura hacen la retroalimentación.

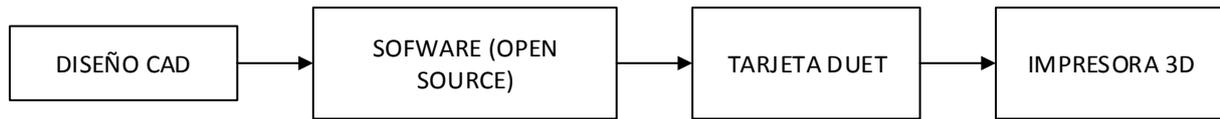


Figura 31. Esquema del sistema de control de la impresora 3D multiextrusor.

3.8.1. Diagramas de flujo

En las Figuras: Figura 27, Figura 28 y Figura 29 se detallan los diagramas de flujo del sistema de control general de la máquina y el diagrama de flujo para el modo USB y el modo HMI de la máquina.

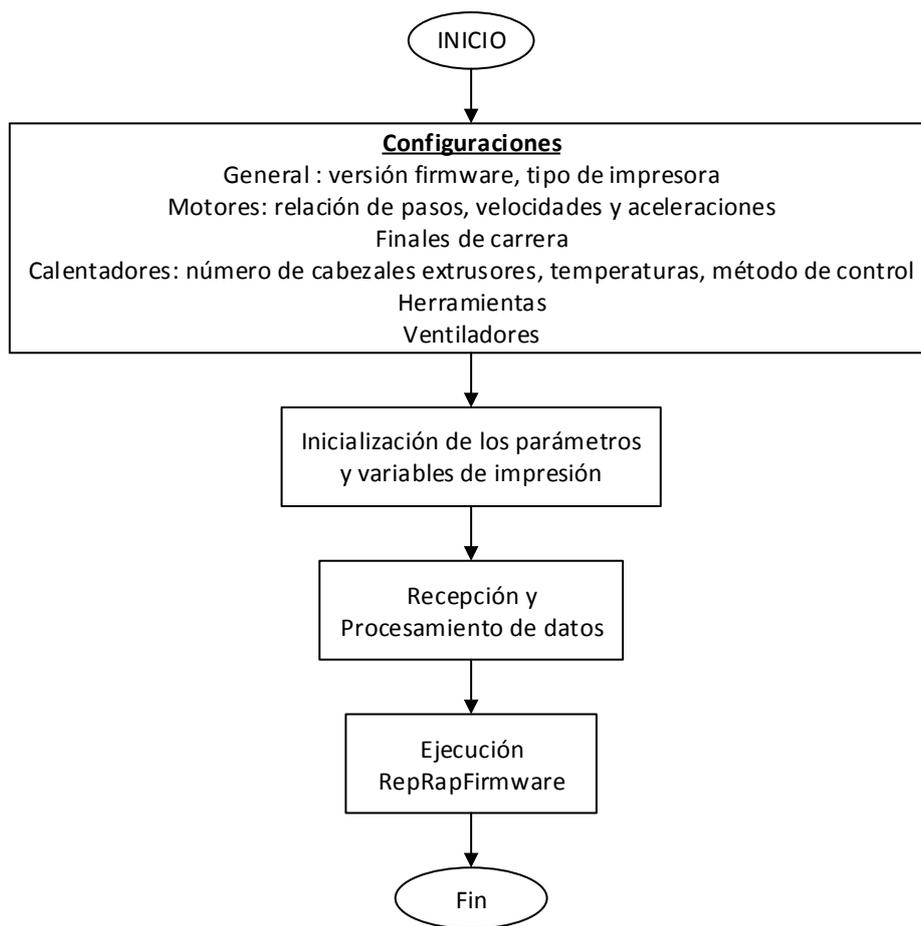


Figura 32. Flujograma del sistema de control general de la máquina.

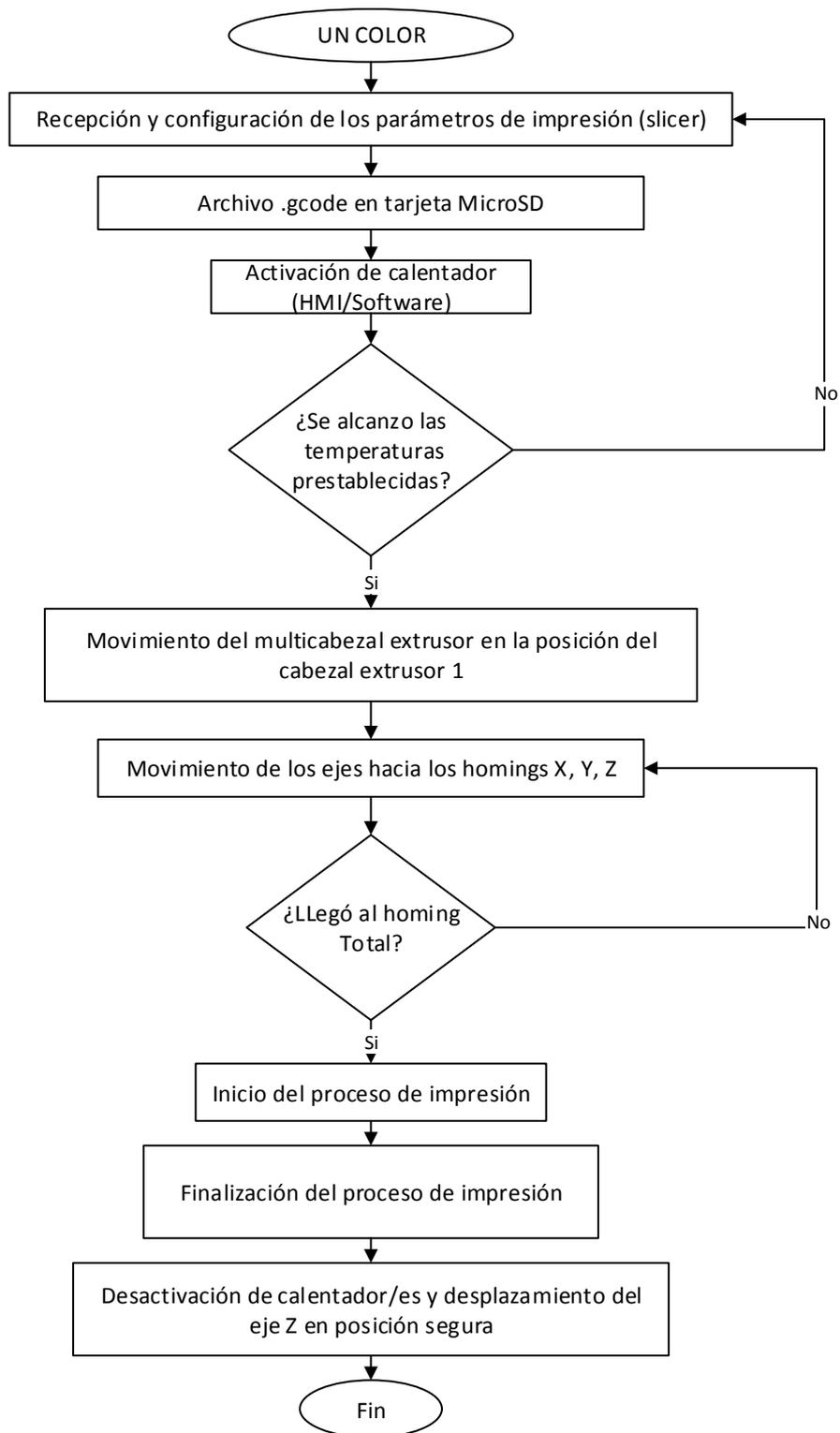


Figura 33. Flujograma del funcionamiento de la máquina para impresión en un color.

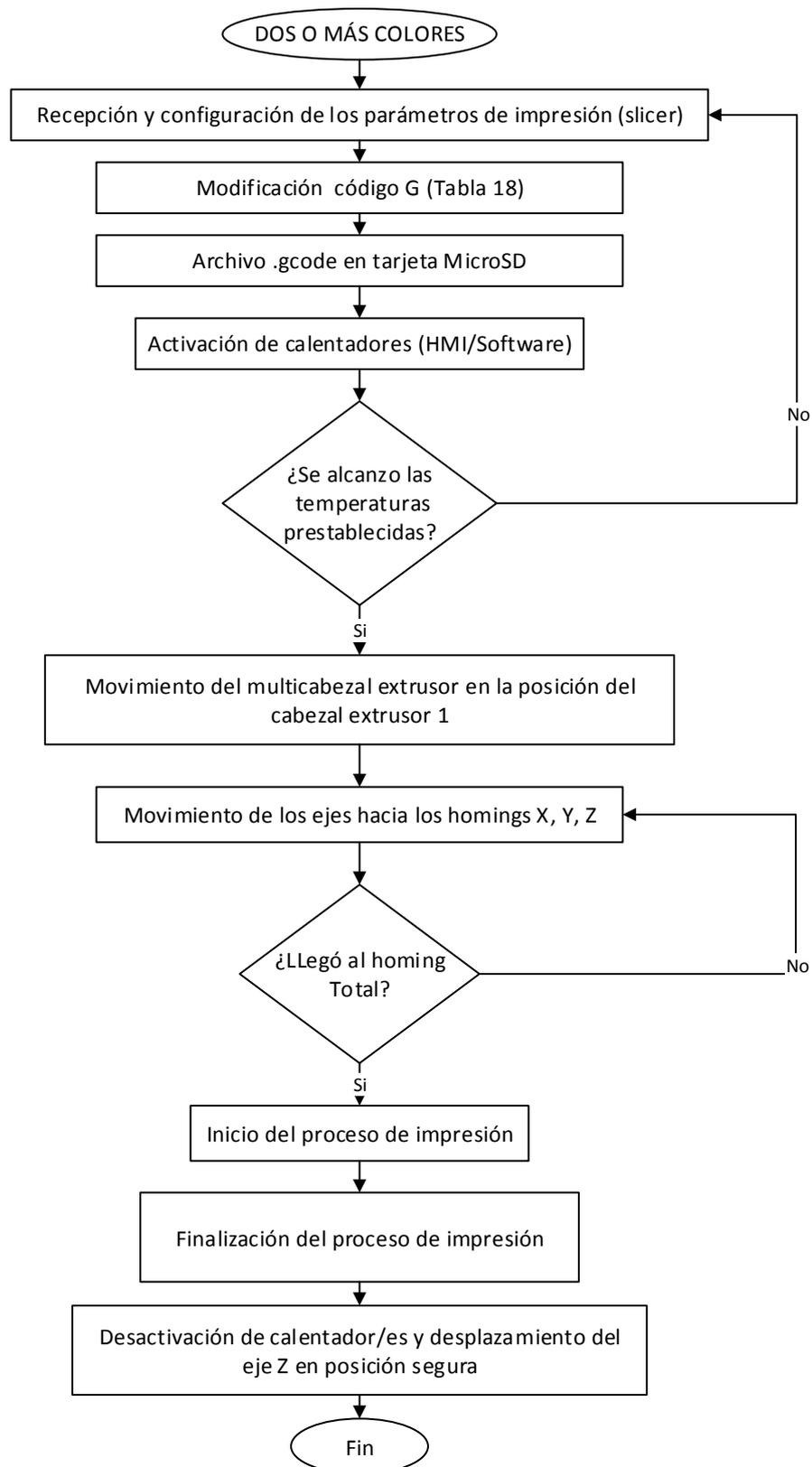


Figura 34. Flujograma del funcionamiento de la máquina para impresión de dos o más colores.

3.8.2. Cálculo de los parámetros y configuraciones del firmware de la tarjeta controladora Duet

En esta sección se procederá a realizar el cálculo de la relación de pasos para los motores de los cabezales extrusores, también se procederá a realizar mediciones de las resistencias para el correcto funcionamiento de los termistores y se utilizará la herramienta de configuración de RepRapFirmware para obtener las configuraciones de los motores, calentadores, termistores, herramientas y ventiladores, que conformarán parte de la configuración final del firmware de la tarjeta controladora Duet.

3.8.2.1. Cálculo de la relación de pasos para el control de motores de los cabezales extrusores

Para controlar el desplazamiento y velocidad de los motores que forman parte de los cabezales extrusores, se envían pulsos mediante señales PWM a frecuencias que varían dependiendo de la velocidad requerida. Para controlar el desplazamiento de cada uno de los motores de los extrusores se realiza el cálculo de los pasos por milímetro, mediante la ecuación (20) (RepRapWiki, 2015).

$$\text{Pasos por mm} = \frac{\text{Prev}_{motor} * \text{Micropasos del driver}}{\text{Diámetro efectivo engrane} \times \pi} \quad (20)$$

Donde:

- $\text{Prev}_{motor} = 200$ (Tabla 12)
- $\text{Micropasos del driver} = 16$
- $\text{Diámetro efectivo engrane} = 11\text{mm}$ (Mecanismo Mk8)

$$\text{Pasos por mm} = \frac{200 * 16}{11 \times \pi} = 95,6 \text{ pasos/mm} \quad \text{Ref(7)}$$

Se obtiene un valor de 95,6 pasos/mm el cual se incluirá en la configuración del firmware de la tarjeta controladora Duet.

3.8.2.1.1. Configuración de los parámetros

M92 E95.6:95.6:95.6:95.6:9.6:420 ; pasos por mm
 M566 E120:120:120:120:120:120 ; velocidades instantáneas máximas (mm/min)
 M203 E1200:1200:1200:1200:1200:1200 ; velocidades máximas (mm/min)
 M201 E250:250:250:250:250:250 ; Aceleraciones (mm/s²)

En donde las velocidades y aceleraciones se obtuvieron utilizando la herramienta de configuración de RepRapFirmware.

3.8.2.2 Parámetros para el control de calentadores

El sistema de control de los calentadores lo conforman los sensores de temperatura y los cartuchos calentadores. Por lo tanto, para controlar los calefactores se emplea el algoritmo de control de la temperatura que se encuentra dentro de la tarjeta controladora Duet, el cual lee la temperatura medida desde los termistores y envía una señal a los transistores MOSFET que conectan o desconectan la energía de 12V de cada uno de los cartuchos calentadores.

3.8.2.2.1. Configuración de los parámetros

M143 S300 ; Temperatura máxima de los calentadores igual a 260°C.
 M305 P0 T100000 B4138 R4700 ; Parámetros +ADC del calentador número 0 (Extrusor E0)
 M305 P1 T100000 B3500 R4700 ; Parámetros +ADC del calentador número 0 (Extrusor E1)
 M305 P2 T100000 B3500 R4700 ; Parámetros +ADC del calentador número 0 (Extrusor E2)
 M305 P3 T100000 B3450 R4700 ; Parámetros +ADC del calentador número 0 (Extrusor E3)
 M305 P4 T100000 B3841 R4700 ; Parámetros +ADC del calentador número 0 (Extrusor E4)
 M305 P5 T100000 B4138 R4700 ; Parámetros +ADC del calentador número 0 (Extrusor E5)
 M305 P6 T100000 B4138 R4700 ; Parámetros +ADC del calentador número 0 (Extrusor E6)

Donde se midió las resistencias de los termistores a tres temperaturas diferentes y se obtuvo los correspondientes coeficientes B.

3.8.2.3. Parámetros para el control de las herramientas

Para la utilización de dos o más cabezales extrusores es necesario configurar las herramientas, que no es más que la asignación de extrusores para cada herramienta, y también se lleva a cabo la configuración de las temperaturas (°C) de activación y de standby de cada extrusor.

M563 P0 D0 H1 ; Se define la herramienta T0, correspondiente al extrusor E1.
 G10 P0 X0 Y0 Z0 ; Se configura las compensaciones en los tres ejes.

G10 P0 R200 S200 ; Se configura la temperatura activa (R), y la temperatura de standby (S).
 M563 P1 D1 H2 ; Se define la herramienta T1, correspondiente al extrusor E2.
 G10 P1 X0 Y0 Z0 ; Se configura las compensaciones en los tres ejes.
 G10 P1 R245 S245 ; Se configura la temperatura activa (R), y la temperatura de standby (S).
 M563 P2 D2 H3 ; Se define la herramienta T2 correspondiente al extrusor E3.
 G10 P2 X0 Y0 Z0 ; Se configura las compensaciones en los tres ejes.
 G10 P2 R180 S180 ; Se configura la temperatura activa (R), y la temperatura de standby (S).
 M563 P3 D3 H4 ; Se define la herramienta T3 correspondiente al extrusor E4.
 G10 P3 X0 Y0 Z0 ; Se configura las compensaciones en los tres ejes.
 G10 P3 R180 S180 ; Se configura la temperatura activa (R), y la temperatura de standby (S).
 M563 P4 D4 H5 ; Se define la herramienta T5 correspondiente al extrusor E6
 G10 P4 X0 Y0 Z0 ; Se configura las compensaciones en los tres ejes.
 G10 P4 R180 S180 ; Se configura la temperatura activa (R), y la temperatura de standby (S).

La denominación de cada herramienta perteneciente a cada motor del cabezal extrusor es la siguiente:

Herramienta T0 correspondiente al extrusor E1
 Herramienta T1 correspondiente al extrusor E2
 Herramienta T2 correspondiente al extrusor E3
 Herramienta T3 correspondiente al extrusor E4
 Herramienta T5 correspondiente al motor del multicabezal E6

3.8.2.4 Parámetros para el control del motor del multicabezal

Para controlar el movimiento del motor del multicabezal es necesario configurar al motor del multicabezal como un extrusor, es decir:

M563 P5 D5 H6 ; Se define la herramienta T5 correspondiente al extrusor E6 (Motor Multicabezal).
 G10 P5 X0 Y0 Z0 ; Se configura las compensaciones en los tres ejes.

Cálculo de la relación de pasos

Tomando en cuenta, que el plato no dará una vuelta completa, sólo se moverá desde la posición del cabezal extrusor 1 hasta la posición del cabezal extrusor 4, y que de acuerdo a los parámetros de extrusión según la pantalla HMI, cada cambio de posición equivaldrá a 5mm de extrusión.

La configuración de la posición de los extrusores se puede apreciar en la Figura 30:

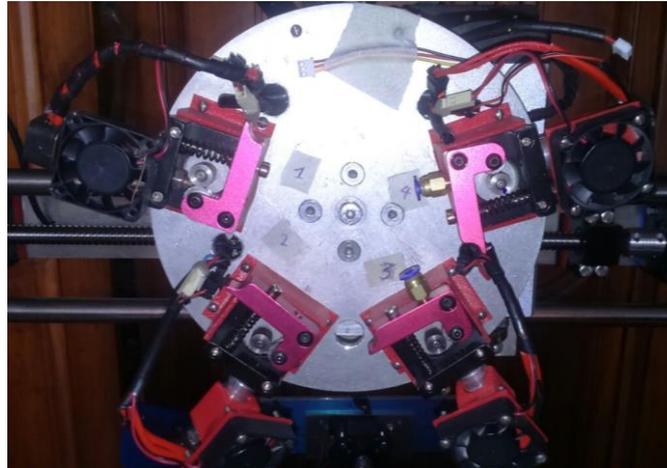


Figura 35. Posición de los cabezales extrusor.

Conociendo que cada cabezal extrusor tiene un ángulo de separación de 72° , y que el cambio de posición de un cabezal extrusor a otro equivale a 5mm de extrusión, se obtiene la cantidad de extrusión en una vuelta completa de 25mm.

La relación de pasos se obtiene con la fórmula (21):

$$R = \frac{P_d}{C * R_s} \quad (21)$$

Donde:

- R = Relación de pasos a calcular
- P_d = configuración de los pasos en el driver = $200 * 8$
- C = cantidad de extrusión en una vuelta
- R_s = relación del sistema de transmisión

$$R = \frac{1600}{25 * \frac{1}{4}} = 256$$

Todos los parámetros y configuraciones obtenidos en esta sección forman parte del archivo “config” perteneciente al firmware definitivo de la máquina, el cual a través de la tarjeta controladora Duet, se encarga de realizar todo el control de drivers, motores, calentadores y termistores.

3.8.3. Código para impresión multicolor

Para la impresión de una pieza de dos o más colores se agregan el código para el cambio de herramienta de un cabezal extrusor a otro. La tabla muestra el código g que deberá ser agregado en el .gcode de la pieza a imprimir

Tabla 17. *Código para impresión multicolor.*

Código	Interpretación
T5	Cambio de herramienta (Motor multicabezal)
G0 F200 E-5	Movimiento del cabezal extrusor de 5mm hacia la izquierda
G92 E0	Restablecimiento de la posición actual
T1	Cambio de herramienta (E2)

CAPITULO IV

RESULTADOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

4.1. Resultado del funcionamiento del cabezal multiextrusor

Después de haber realizado las pruebas de funcionamiento se determinó que el sistema multiextrusor cumple con los requerimientos establecidos, el sistema es liviano, con un peso de 3,23 kg, construido en aluminio, y todos los elementos que lo conforman son desmontables. El cabezal permite cambiar de posición correctamente de un cabezal extrusor a otro mediante su movimiento giratorio, de forma manual o automática. Además, a través del sistema piñón-engrane, se permite aumentar el torque de la entrada de 1,5075 Nm.y reducir la velocidad a la salida del sistema de transmisión de movimiento.

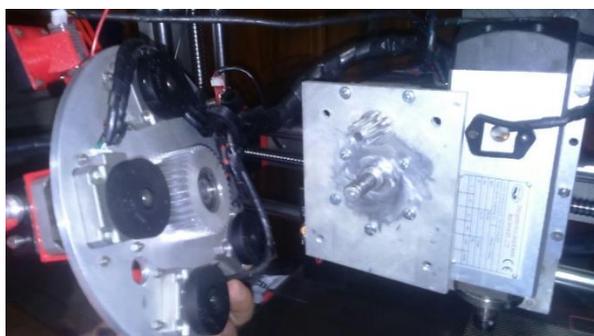


Figura 36. Sistema multiextrusor desmontado.



Figura 37. Sistema multiextrusor montado sobre el eje X.

4.2. Resultado del funcionamiento de un cabezal extrusor.

En cuanto al funcionamiento de cada cabezal extrusor, mediante pruebas de extrusión se procedió a determinar el error de material extruido mediante la tabla

Tabla 18. Determinación del error del material de extrusión.

Longitud en mm del filamento a extruir	Longitud del filamento en mm extruido
50	51
50	50
50	53
50	50
50	48
50	51
50	50
50	49
50	52
50	48
50	49
50	49
50	50
50	50
50	50
50	51
50	50
50	52
50	50
50	50

Obteniendo una media aritmética de 50,15mm, con la cual se obtiene un error de $\pm 0,15$ mm en la extrusión, correspondiente al 0,3% de error, comprobando que la relación de pasos tiene un error mínimo, extruyendo una cantidad de material casi exacta solicitada por el usuario. Además cada cabezal al contar con cartuchos calentadores, se consigue calentar rápidamente el bloque del extrusor, alcanzar altas temperaturas, y mantener la misma temperatura durante todo el proceso de impresión. También se comprobó el correcto funcionamiento del termistor ya que realiza mediciones desde 14°C hasta 300°C.

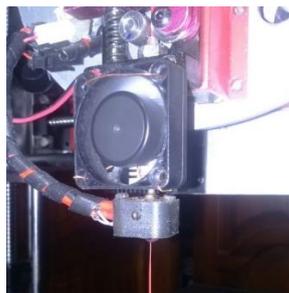


Figura 38. Funcionamiento de un cabezal extrusor.

4.3. Prueba de impresión con un cabezal extrusor

Al haber utilizado un software opensource, (Repetier Host, ver Anexo 13), para generar el slicer y por ende el código de impresión, se tomó el modelo de una mano de dimensiones similares a la de una persona adulta, en la figura 34 se puede observar el proceso de impresión y el modelo ya impreso.



Figura 39. Mano impresa en un color.

Tomando la resolución de 0,012mm de la tesis “Sistema de generación de movimiento para una impresora 3D multiextrusor”, la máquina empleó un tiempo de 32 horas de trabajo continuo en todo el proceso de impresión.

4.4. Prueba de impresión con dos cabezales extrusores

Al haber aumentado el código de cambio de herramienta según los cabezales extrusores a utilizar, el cabezal multiextrusor se movió desde la posición de un cabezal extrusor a otro. El resultado del proceso de impresión se puede apreciar en las figuras.



Figura 40. Proceso de impresión en dos colores, capa 3.



Figura 41. Proceso de impresión en dos colores, capa 5.



Figura 42. Proceso de impresión, capa 10.

Tabla 19. Costos del proyecto

COSTO DEL PROYECTO 3D MILLAPRINT					
Sistema de generación de movimiento					
Cantidad	Descripción	Medida	P. Unt.	P. total	Total
16	Acero normalizado AISI 4340	Kg	3.76	60.16	
6	Ejes para modulo X, Z	U	14.00	84.00	
2	Mecanizado de Ejes Y	U	18.00	36.00	
4	Platina Acero inoxidable 2 1/2x1/4	M	16.70	66.80	
4	Soldadura y corete para módulos X, Y, Z	U	10.00	40.00	
2	Tubo inoxidable 1 1/4	U	45.00	90.00	
1	Soldadura y corte estructura	U	150.00	150.00	
12	Rodamientos lineales	U	14.85	178.21	
	TEN-HIGH Ballscrew SFU1605 RM1605				
4	16mm 550mm with nut+bk/bf12 End Supports+1pcs 6.3510mm Coupler	U	145.60	582.41	
4	Discos de corte	U	3.50	14.00	
4.5	Plancha de aluminio 6mm	Kg	11.2	50.40	
1.8	Plancha de aluminio 3mm	Kg	11.2	18.00	
48	Tornillos hexagonales M6	U	0.18	8.64	
40	Tornillo M6	U	0.16	6.40	
8	Pernos 1/4" x 2"	U	0.21	1.68	
40	Pernos M6	U	0.22	8.80	
16	Pernos M4	U	0.16	2.56	
16	Tornillos M3	U	0.06	0.96	
16	Pernos M5	U	0.19	3.04	
4	Soporte de Motores Nema23	U	12.31	49.27	
4	Ball Nut Mount Bracket Flange Nut Mount for 1605 1610 16mm	U	21.91	87.63	
48	Rodelas de presión	U	0.06	2.88	
16	Seguros	U	0.15	2.40	
23	Sujeciones de piezas impresas	U	2.00	46.00	
4	Motor NEMA23	U	42.00	168.00	
2	Ventiladores	U	4.00	8.00	
4	SainSmart TB6600 CNC Micro-Stepping Stepper Motor Driver 4.5A	U	36.98	147.91	
1	Fuente 24V 15A	U	38.00	38.00	
3	Finales de Carrera	U	5.00	15.00	
2	Cables conectores	U	4.00	8.00	
20	Cable # 14	M	0.30	6.00	
20	Cable # 16	M	0.36	7.20	
20	Cable # 20	M	0.15	2.00	
10	Cable gemelo flexible 14 AWG	M	1.00	10.00	
5	Conectores	U	2.00	10.00	
3	Fusible	U	0.20	0.60	
1	Relé de protección	U	15.00	15.00	
1	Plancha de latón 1/32, corte y pintura	U	30.00	30.00	
1	Otros gastos	U	25.00	25.00	
1	DUET CONTROLLER V0.8.5	U	178.12	178.12	
600	Ingeniería (horas de trabajo hombre)	H	2.30	1380.00	
	Total			3639.07	

Multicabezal extrusor				
2.5	Plancha de aluminio 6mm	Kg	10.00	25.00
0.3	Eje aluminio 19mm	M	23.00	6.90
0.1	Eje aluminio 70mm	M	170.00	17.00
10	Tornillo M6	U	0.16	1.60
30	Tornillos 1/8" x 3/4"	U	0.02	0.60
6	Tornillos 3/16"x1"	U	0.14	0.70
4	Tornillos 1/4" x 2"	U	0.10	0.40
1	Mecanizado y corte de planchas de aluminio, eje y soldado	U	40.00	40.00
40	Mecanizado de engranes por cada diente	U	1.00	50.00
1	Prisionero M3	U	0.15	0.15
1	Seguro interno #23	U	0.26	0.26
1	Seguro externo	U	0.15	0.15
2	Rodamiento lineal 6201	U	1.50	3.00
1	Eje cromado para rodets	U	5.00	5.00
4	Motores Nema17	U	16.00	64.00
4	Driver pololu DRV8824 2A	U	5.00	20.00
1	Arduino CNC shieldV3	U	10.00	10.00
20	Cable # 20	M	0.15	2.00
20	Cable # 14	M	0.30	6.00
20	Cable # 16	M	0.36	7.20
10	Cable UTP flexible	M	0.80	8.00
24	Autocoplador CT817C	U	0.70	16.80
10	Taipe	U	0.50	5.00
3	Fuentes 12V	U	18.00	56.00
1	Relé estado solido	U	15.00	15.00
8	Brocas	U	4.00	32.00
1	Cama de silicona	U	90.00	90.00
4	Mecanismo acarreo MK8	U	14.00	56.00
1	Motor Nema 23 1.9N	U	54.94	54.94
4	Conectores	U	2.00	8.00
1	Vidrio templado	U	30.00	30.00
1	Espiral para cable 3/4x5	U	12.00	12.00
2	Espiral para cable 1/4x10	U	15.00	30.00
1	Amarras plásticas	U	2.00	2.00
1	SainSmart TB6600 CNC Micro-Stepping Stepper Motor Driver 4.5A	U	36.98	36.98
4	Resortes amortiguadores	U	3.00	12.00
4	RepRapDiscount, Hexagon Full Metal Hot End, Hotend, 1.75mm, .4mm nozzle	U	75.20	300.08
10	Sujeciones de piezas impresas	U	3.00	30.00
1	DUEX4 EXPANSION BOARD	U	82.20	82.20
1	PANELDUE	U	130.14	130.14
1	Otros gastos	U	50.00	50.00
5	Materiales de impresión	U	55.00	275.00
400	Ingeniería (horas de trabajo hombre)	H	2.30	920.00
	Total			2527.10

2527.10

Para la implementación del proyecto de tesis se utilizó materiales mecánicos, eléctricos, electrónicos y procesos de mecanizado. De acuerdo a la Tabla 19 se invirtió un total de \$6166,17. Por lo tanto el proyecto “Sistema de movimiento giratorio y selección de cuatro extrusores para una impresora 3D” es de \$2527,10, considerando que es un prototipo inicial, su costo es bajo, comparado con otras máquinas de similares características, lo cual nos indica que el proyecto si es factible.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El extremo caliente de tipo hexagonal permite la extrusión de materiales como PLA, ABS, PTU, ABS-Fibra de carbono, empleando largos periodos de trabajo sin ningún inconveniente.
- Al tener un sistema giratorio para la selección de los cabezales extrusores, se permite trabajar con un solo cabezal extrusor, evitando que los demás cabezales extrusores ocasionen problemas en el proceso de impresión; y al contar con un sistema de transmisión de tipo piñón-engrané, se consigue aumentar el torque a la salida del sistema, facilitando el cambio de posición de los cabezales extrusores a velocidades intermedias, evitando descuadres o atrancamientos en los ejes.
- La utilización del código abierto facilita la modificación del software, de modo que se puedan realizar configuraciones de parámetros, así el código de cambio de herramienta para el cambio de posición de cada cabezal extrusor, permitió el correcto funcionamiento del mecanismo multiextrusor en una impresora 3D.
- Se tiene un cabezal multiextrusor desmontable y liviano, acoplándose fácilmente al prototipo del sistema de generación de movimiento.
- A través del sistema multiextrusor se obtuvo objetos impresos en más de dos colores, además de que se puede trabajar con varios tipos de materiales, logrando robustez utilizando filamentos de tipo ABS, PLA, Fibra de carbono, u obteniendo flexibilidad gracias al TPU, y gracias a la resolución del prototipo del sistema de generación de movimiento al que se encuentra montando el sistema multiextrusor, se tiene una alta calidad de impresión.

Recomendaciones

- Se recomienda la continuación del proyecto de tesis, con la finalidad de aplicar diferentes sistemas de control y mejorar la funcionalidad de la máquina.
- Es aconsejable poseer conocimientos de programación de tarjetas de control de impresoras 3D, para que cualquier modificación a realizarse en el software resulte más fácil, y así se permita adaptarse de mejor manera al sistema que se va a implementar.
- Se recomienda realizar un estudio acerca de combinación de colores y materiales de filamentos de impresión 3D, así como un estudio térmico acerca de extrusores.
- Se sugiere realizar un proceso de acabado superficial a piezas impresas, para mejorar la calidad y estética de las mismas.
- Se sugiere la utilización de cualquier software open source, para así obtener el código g de impresión de manera más sencilla y rápida.

Bibliografía

- 3DByou. (s.f.). *3DByou*. Recuperado el 31 de Octubre de 2017, de <http://3dbyou.blogspot.com/2016/11/tipos-de-hot-end.html>
- 3dxtech. (2017). *3dxtech*. Recuperado el 21 de Mayo de 2017, de <https://www.3dxtech.com/technical-data/>
- Advanced Micro Controls, I. (s.f.). *amci.com*. Recuperado el 27 de Octubre de 2017, de <https://www.amci.com/industrial-automation-resources/plc-automation-tutorials/stepper-vs-servo/>
- amazon*. (2017). Recuperado el 2 de Noviembre de 2017, de https://www.amazon.es/dp/B01LO3HHKW/ref=sspa_dk_detail_3?psc=1
- Beer, F., Russell Johnston, E., & Clausen, W. (11 de Noviembre de 2007). *Dinámica Vectorial para Ingenieros*. México, D.F.: McGraw-Hill. Recuperado el 23 de Noviembre de 2017, de <http://cem.epn.edu.ec/applets/APPLETS/12%20Din%C3%A1mica%20de%20Rotaci%C3%B3n/303%20Momento%20de%20inercia/inercia.htm>
- Berchon, M., & Luyt, B. (2014). *La Impresión 3D*. Barcelona, España: Gustavo Gill, SL.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México: McGraw-Hill. Recuperado el 11 de Enero de 2018
- Casillas, A. (1997). *Cálculos de Taller*. Madrid: Palacios. Recuperado el 31 de Octubre de 2017
- Castro, P. (10 de Agosto de 2012). *paolaandreacastropalomino.blogspot*. Recuperado el 17 de Julio de 2017, de <http://paolaandreacastropalomino.blogspot.com/2012/08/transmision-de-potencia.html>

- Cejarusu. (2005). *concurso.cnice.mec.es*. Recuperado el 27 de Marzo de 2017, de http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/mecanismos/mec_cremallera-pinon.htm
- Chancusi, S., & Navarrete, P. (2014). *Diseño y construcción de una impresora 3D auto-replicable controlada inalámbicamente para el prototipado de piezas plásticas de bajo costo, mediante software libre*. Latacunga.
- Crocker, D. (26 de Octubre de 2017). *miscsolutions.wordpress*. Obtenido de <https://miscsolutions.wordpress.com/paneldue/>
- e-educativa.catedu.es. (s.f.). *e-educativa.catedu.es*. Recuperado el 26 de Mayo de 2017, de http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1101/html/3_transmisin_por_poleas_y_correas_o_cadenas.html
- Ferrer, J. (10 de Junio de 2014). *makershop*. Recuperado el 27 de Octubre de 2017, de <https://makershopbcn.com/hexagon-hotend>
- Ferrer, J. (15 de octubre de 2014). *makerShop*. Recuperado el 20 de Mayo de 2017, de <https://makershopbcn.com/abs-vs-pla-que-diferencia-existe-entre-estos-dos-filamentos-para-impresora-3d>
- filament2print. (2016). *filament2print*. Recuperado el 30 de Octubre de 2017, de <https://filament2print.com/es/repuestos-y-extras/823-cartucho-calentador-e3d-original.html>
- Frax, J. (10 de Septiembre de 2015). *FRAX3D*. Recuperado el 30 de Junio de 2017, de <http://frax3d.com/extrusor-bowden>

Guerrero, E. (2017). *Cabecal multiextrusor para 3D*. Ibarra. Recuperado el 17 de Noviembre de 2017, de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/7301>

Hoffmann, C. (2004). *Manual de motores eléctricos Weg*. Recuperado el 14 de Noviembre de 2017, de <http://biblioteca.upnfm.edu.hn/images/directorios%20tematicos/xxtindustrial/libros%20de%20electricidad/Maquinas%20electricas/manual%20de%20motores%20electricos%20-%20weg.pdf>

Infographics. (11 de Diciembre de 2011). *troweprice.com*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2017, de https://individual.troweprice.com/staticFiles/Retail/Shared/PDFs/3D_Printing_Infographic_FINAL.pdf

keenovo. (2017). *keenovo*. Recuperado el 30 de Octubre de 2017, de <https://www.keenovo.com/products/silicone-heater.html>

L SER: CLASES, riesgos, medidas de control. (s.f.). (Sprl.upv.es) Obtenido de http://www.sprl.upv.es/IOP_RF_01%28a%29.htm

L. Mott, R. (2004). *Diseño de Elementos de Máquinas*. México: Pearson Educación. Recuperado el 10 de Mayo de 2017

Laureto , J., & Pearce, J. (2017). *Open Source Multi-Head 3D Printer for Polymer-Metal*. United States. Recuperado el 15 de Agosto de 2017, de <http://www.mdpi.com/2227-7080/5/2/36/pdf>

López, J. E., & Jaramillo Ceballos, A. (2015). *TodoRobot*. Pereira. Recuperado el 31 de Enero de 2018, de

<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5905/621815L864d.pdf;sequence=1>

Martín, J. R. (26 de Septiembre de 2014). *plabs3d.com*. Recuperado el 30 de Octubre de 2017, de <https://recicla3dplabs.wordpress.com/2014/09/26/tecnologia-de-modelado-por-deposicion-fundida-fdm/>

Michaeli, W. (1992). *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*. New York.

Miranda, C. V. (2012). *Sistemas de control continuos y discretos*. Madrid: Paraninfo.

Montes, V. (18 de Mayo de 2014). *equipo4conalep1*. Recuperado el 5 de Junio de 2017, de <http://equipo4conalep1.blogspot.com/2014/05/indice-transmision-de-potencia-bandas.html>

Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas* (Cuarta ed.). México: Pearson Educación.

Mouser Electronics. (2017). *Mouser Electronics*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2017, de http://www.mouser.com/ds/2/136/glass_enc_sensors__b57560__g560__g1560-299239.pdf

National Instruments. (2014). *National Instruments*. Recuperado el 4 de Noviembre de 2017, de <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-311>

naylampmechatronics. (s.f.). *naylampmechatronics*. Recuperado el 27 de Octubre de 2017, de <http://www.naylampmechatronics.com/impresion-3d-cnc/209-hotend-e3d-v6-tipo-bowden.html>

NinjaTek. (s.f.). *NinjaTek*. Recuperado el 15 de Abril de 2017, de <https://ninjatek.com/products/filaments/ninjaflex/>

Ortega, A. J. (2017). *Fabricación digital: Introducción al modelado e impresión 3D*. Aula MENTOR.

Oviedo, C. (s.f.). *Servicio de Prevención de Riesgos Laborales - Fresadora*. (Prevencion.uniovi.es) Obtenido de <http://www.prevencion.uniovi.es/seguridad/seguridadtaller/fresadora>

Oyandedel, J. P. (2017). *FayerWayer*. Recuperado el 26 de Septiembre de 2017, de <https://www.fayerwayer.com/2013/07/los-7-usos-mas-innovadores-de-las-impresoras-3d/>

PanucattDevices. (2017). *Panucatt Devices*. Recuperado el 31 de Octubre de 2017, de <http://www.panucatt.com/mobile/Product.aspx?id=37858>

Pérez, N. J. (s.f.). *unitec*. Recuperado el 30 de Octubre de 2017, de <http://www.unitec.edu.ve/materiasenlinea/upload/T1954-5-1.pdf>

PololoCorporation. (2017). *Pololu Corporation*. Recuperado el 1 de Noviembre de 2017, de <https://www.pololu.com/product/2132>

RepRapWiki. (26 de Diciembre de 2015). *reprap.org*. Recuperado el 5 de Noviembre de 2017, de http://reprap.org/wiki/Triffid_Hunter%27s_Calibration_Guide

riesgo de exposición al ruido. (s.f.). (Gencat.cat) Obtenido de <http://www.gencat.cat/bsf/ssl/es/html/>

R-Luis. (2017). *xbot*. Recuperado el 7 de Diciembre de 2017, de <http://r-luis.xbot.es/index.html>

Rodríguez, J. (22 de Septiembre de 2014). *mibqyyo*. Recuperado el 18 de Junio de 2017, de http://www.mibqyyo.com/articulos/2014/09/22/asi-funciona-la-extrusion-en-las-impresoras-3d/#/vanilla/discussion/embed/?vanilla_discussion_id=0

- Rodríguez, J. P. (2014). *Implementación de triple extrusor sobre impresora 3D de bajo coste*. Madrid.
- Ruiz, G. (2018). *Implementación de un sistema multicabezal a una impresora 3D*. Ibarra. Recuperado el 1 de Enero de 2018
- Ruiz, G. (2018). *Implementación de un sistema multicabezal a una impresora 3D*. Ibarra, Ecuador. Recuperado el 13 de Diciembre de 2017
- SainSmart. (2017). *SainSmart*. Recuperado el 30 de Octubre de 2017, de <https://www.sainsmart.com/products/sainsmart-reprap-mk2b-3d-printers-dual-power-pcb-heatbed-heat-bed-12-24v-updated-version-of-mk2a>
- SchneiderElectric. (2 de Diciembre de 2007). *Servo Accionamientos*. Recuperado el 31 de Octubre de 2017, de <https://tv.uvigo.es/uploads/material/Video/626/ACCIONAMIENTOS.pdf>
- Spadaro, J. (2016). *Printspace3D*. Recuperado el 17 de Mayo de 2017, de <https://www.printspace3d.com/cartesian-vs-delta-printers-work/>
- Think3dPrint3d. (2 de Diciembre de 2013). *Think3dPrint3d*. Recuperado el 20 de Julio de 2017, de <http://blog.think3dprint3d.com/2013/12/Duet-Arduino-Due-compatible-3DPrinter-controller.html>
- Tippens, P. (2011). *Física, Conceptos y Aplicaciones* (7ma ed.). McGraw-Hill. Recuperado el 22 de Noviembre de 2017, de <https://cienciasjersastre.files.wordpress.com/2016/09/fisica-7ma-tippens.pdf>
- Tofighi, A. (2015). *SPAINLABS*. Recuperado el 22 de Junio de 2017, de <https://www.spainlabs.com/foros/tema-bowden-directo-o-con-engranaje>

uniovi. (s.f.). *uniovi*. Recuperado el 2 de Noviembre de 2017, de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/POLIMEROS.Tema6.ReologiaFUNDIDOS.2009.2010.pdf>

Viloria, J. R. (2003). *Manual del Electromecánico de mantenimiento*. Paraninfo. Recuperado el 30 de Octubre de 2017

Wood, S. (2015). *recreus*. Recuperado el 3 de Noviembre de 2017, de <https://recreus.com/blog/learn/?lang=en>

