

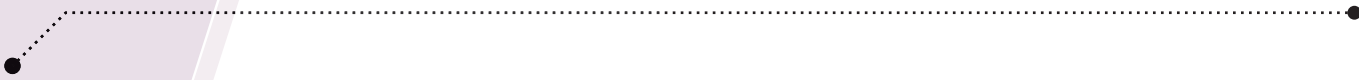
DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE UNA IMPRESORA 3D DIDÁCTICA DE GRAN ESCALA

MECHANICAL DESIGN OF THE STRUCTURE OF A DIDACTIC LARGE-SCALE 3D PRINTER

PROJETO DA ESTRUTURA DE UMA IMPRESSORA 3D DIDÁTICA DE GRANDE ESCALA

Carlos Aguirre Rodríguez
Germán Gutiérrez Arias
Edwin Gómez Naizaque
Juan Velásquez Paredes
Liseth González López

- ª Ingeniería Mecánica, Prototipado Rápido,
Universidad Santo Tomás, Tunja,
carlos.aguirre@usantoto.edu.co
- º Ingeniería Mecánica, Prototipado Rápido,
Universidad Santo Tomás, Tunja,
german.gutierrez@usantoto.edu.co
- º Ingeniería Mecánica, Prototipado Rápido,
Universidad Santo Tomás, Tunja,
edwin.gomezn@usantoto.edu.co
- ª Ingeniería Mecánica, Prototipado Rápido,
Universidad Santo Tomás, Tunja,
juan.velasquez@usantoto.edu.co
- º Ingeniería Mecánica, Prototipado Rápido,
Universidad Santo Tomás, Tunja,
liseth.gonzalez@usantoto.edu.co

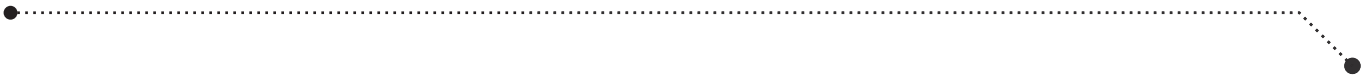


Resumen— La impresión 3D es una aplicación que se ha venido utilizando en la industria para la fabricación de piezas. Permite el prototipado de diseños personalizados y geometrías complejas. En la Universidad Santo Tomás, seccional Tunja, se ha visto la necesidad de mejorar la calidad en los proyectos de las áreas de investigación y de aula. Se diseñó una impresora 3D de mayor escala, respecto con las que cuenta la universidad; que conservara la calidad, la resistencia de las piezas y la precisión metrológica. Se evaluaron las ventajas y desventajas de las alternativas de diseño. Se analizó principalmente su estabilidad, resistencia a esfuerzos, y capacidad volumétrica. Además, se tendrán en cuenta equipos para la fabricación, como la impresora 3D y máquinas por arranque de viruta con los que ya cuenta la universidad. El diseño final, surge y demuestra la posibilidad de fabricar una impresora 3D de bajo costo con características similares, respecto a las que se encuentran en el mercado; usando materiales y métodos de manufactura asequibles. Además de la unión de componentes prototipados con piezas comerciales, cumpliendo una óptima funcionalidad.

Palabras clave— Diseño estructural, funcionalidad, impresora 3D, manufactura, prototipado rápido.

Abstract— 3D printing is an application that has been used in the industry for the manufacture of parts. It allows the prototyping of custom designs and complex geometries. In the Santo Tomás University, in Tunja, the need to improve the quality of the projects in the research and classroom areas has been seen. A larger-scale 3D printer was designed, with respect to those that the university has; which conserves the quality, the resistance of the pieces and the metrological precision. Advantages and disadvantages were evaluated of the design alternatives. Its stability, stress resistance and volumetric capacity, were mainly analyzed. In addition, equipment for manufacturing will be taken into account, such as the 3D printer and chip startup machines that the university already has. The final design emerges and demonstrates the possibility of manufacturing a low-cost 3D printer with similar characteristics, compared to those found in the market; using affordable materials and manufacturing methods. In addition to the union of prototyped components with commercial parts., fulfilling optimal functionality.

Keywords—Structural design, functionality, 3D printer, manufacturing, rapid prototyping.



Resumo— A impressão 3D é um aplicativo usado na indústria para a fabricação de peças. Permite a criação de protótipos de projetos personalizados e geometrias complexas. Na Universidade de Santo Tomás, seção Tunja, foi observada a necessidade de melhorar a qualidade dos projetos nas áreas de pesquisa e sala de aula. Uma impressora 3D de maior escala foi projetada, em comparação com as da universidade; isso conservará a qualidade, a resistência das peças e a precisão metrológica. Foram avaliadas as vantagens e desvantagens das alternativas de design. Sua estabilidade, resistência ao estresse, e capacidade volumétrica, foram analisados principalmente. Além disso, serão levados em consideração equipamentos para fabricação, como as impressoras 3D e as máquinas especializadas na remoção de aparas de metal que a universidade já possui. O design final surge e demonstra a possibilidade de fabricar uma impressora 3D de baixo custo com características semelhantes, em comparação com as existentes no mercado; usando materiais e métodos de fabricação acessíveis. Além da união de componentes prototipados com peças comerciais, cumprindo a funcionalidade ideal.

Palavras chave— Projeto estrutural, funcionalidade, impressora 3D, fabricação, prototipagem rápida.

I. INTRODUCCION

En la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomás, la elaboración de proyectos de investigación y de las asignaturas, es fundamental para el aprendizaje de estudiantes y docentes en las diferentes áreas de conocimiento. Estos proyectos van desde desarrollos teóricos hasta la fabricación y evaluación de prototipos. Para la manufactura de éstos, se utilizan herramientas manuales, impresoras 3D y maquinaria presente en la universidad, ya que contribuyen al aprendizaje, aplicación de técnicas que refuerzan los conceptos teóricos de distintas áreas (Blázquez, Orcos, Mainz, & Sáez, 2018). Sin embargo, se ha observado la limitación que tienen las máquinas por arranque de viruta, como la elaboración de ciertas geometrías. Sumado a la corta experiencia en la manipulación de estos equipos y la destreza que implica fabricar una pieza de geometría compleja, lo cual limita el alcance de un óptimo aprovechamiento. En el caso de la manufactura aditiva, las dimensiones de impresión son condicionadas y presentan dificultades como en la impresión de geometrías "en el aire".

Debido a esto, se identificó la necesidad de diseñar y fabricar una impresora 3D, que cuente con mayor capacidad volumétrica, y que conserve las características de precisión y exactitud para el prototipado de diseños personalizados. Se tomó como base la impresora con la que cuenta la universidad, de esta manera poder mejorar aspectos de estabilidad, tamaño,

distribución de diferentes componentes mecánicos y electrónicos. También, se revisaron diseños propios y externos que se pudieran aplicar y aportaran ideas o soluciones de diseño (Derré, Santolaria, & Brosted, 2014).

Con la implementación de esta herramienta de fabricación, se mejorarían los tiempos de conformado de piezas, impulsaría una primera línea de producción y se podrá adquirir nuevos conocimientos sobre el prototipado en 3D. Teniendo como precedente el uso de la impresora 3D para métodos más simples como diseños en etapas iniciales, piezas para experimentar su comportamiento y funcionamiento temporal. Actualmente, la tecnología en constante avance, estas impresoras se han ido adaptando para conservar calidad, resistencia de piezas, precisión en medidas, igualdad en geometrías, con esto se obtiene un estudio detallado en el diseño y funcionalidad (Roach, y otros, 2019).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto se trabajó a través de un proceso de investigación aplicada, con la hipótesis y la posibilidad de desarrollar los sistemas mecánicos de una impresora 3D didáctica de bajo costo y gran escala. Utilizando materiales de fabricación alternativos de fácil adquisición, que permitan reducción de costos en fabricación y operación (Rúa, Jiménez, Gutiérrez, & Villamizar, 2018).

En primer lugar, es necesario caracterizar el producto desde varias perspectivas

como, por ejemplo, necesidades del cliente, características de calidad, funciones del producto, mecanismos, componentes necesarios, entre otros. Posteriormente, se identifican los parámetros de mayor incidencia en la calidad; como estructura, componentes electrónicos y materiales para su construcción.

Se implementó la metodología QFD (Despliegue de la función de calidad) para identificar las necesidades del cliente y la posterior planificación del diseño, teniendo en cuenta los parámetros que se desprenden del mismo. A continuación, en la Tabla 1. y Tabla 2. se evidencia los requerimientos de cliente y del diseño para la impresora.

Tabla 1. Requerimientos de cliente

Requerimientos del Cliente	
1	Costos
2	Dimensiones (1 m3)
3	Seguridad de la máquina
4	Velocidad de impresión
5	Versatilidad de impresión
6	Sistema de control universal

Fuente: Autor

Tabla 2. Requerimientos del diseño

Requerimientos de Diseño	
A	Materiales
B	Elementos de control
C	Partes Móviles
D	Partes estructurales
E	Elementos de potencia
F	Transmisión de potencia

Fuente: Autor

En la Tabla 3. se identifica la evaluación detallada de los aspectos presentados anteriormente. Evaluando los parámetros

de diseño en relación a las demandas del cliente. Con un criterio de satisfacción de la siguiente manera: 0 = no satisface, 3 = lo satisface parcialmente, 9 = lo satisface plenamente.

Tabla 3. QFD para el diseño de la impresora

		A	B	C	D	E	F
1	0,3	9	2,7	9	2,7	9	2,7
2	0,2	9	1,8	9	1,8	9	1,8
3	0,2	3	0,6	9	1,8	9	1,8
4	0,1	3	0,3	3	0,9	3	0,9
5	0,05	3	0,15	3	0,15	3	0,15
6	0,15	9	1,35	9	1,35	9	1,35
TOTAL		5,55	6,75	7,35	6,75	7,35	7,35

Fuente: Autor

Según los resultados obtenidos en el análisis QFD se establece la importancia de los sistemas frente al diseño. También, esto permite seleccionar de manera adecuada los componentes mecánicos y electrónicos que complementan el diseño CAD. Por ejemplo, un parámetro relevante, como la velocidad de impresión, conlleva a seleccionar elementos de transmisión de potencia como el sistema de poleas y correa, para el eje z, sobre los tornillos de bolas recirculantes o tornillo sin fin. Este sistema es capaz de generar mayor velocidad ya que es directamente proporcional al diámetro de la polea (mayor diámetro significa mayor velocidad lineal). A diferencia del tornillo que controla el desplazamiento de la boquilla, sobreponiendo la calidad de la impresión a la velocidad.

Preliminarmente, a través de una lluvia de ideas y propuestas del equipo interdisciplinar, que está conformado por estudiantes de ingeniería mecánica, e ingenieros electrónicos. Se realiza una

comparación, discusión de ventajas, desventajas, costos, y dimensiones, entre las propuestas de diseño planteadas. Con el fin de obtener un diseño que responda adecuadamente a las necesidades y limitaciones de fabricación. Finalmente se selecciona la opción de diseño para implementar en el prototipo (Void Create, 2016). Para esta selección también se analizaron diseños de varias impresoras comerciales con el propósito de adaptar sistemas útiles que brinden solución a las problemáticas observadas en las propuestas. Una de estas, es de la empresa ErectorBot que se encarga del diseño y la fabricación de impresoras de gran escala, donde la cama de impresión es fija, permitiendo mayor volumen de trabajo. En la Fig. 1. se observa el modelo EB644LX la cual tiene dimensiones de 6x4x4 pies, y se evidencia el sistema de movimiento de la estructura.

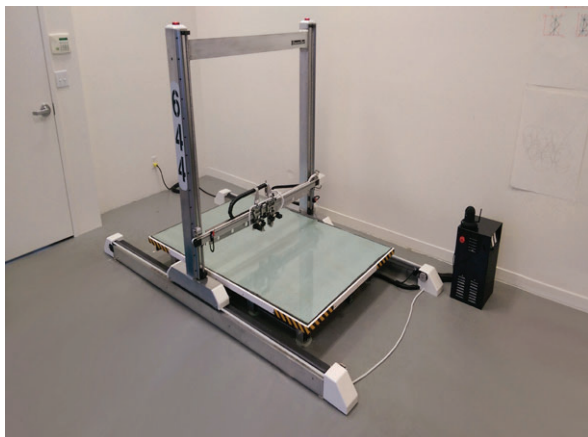


Fig. 1. ErectorBot EB644LX.
Fuente: ErectorBot Stor

Se aborda el diseño de la estructura de soporte de los mecanismos, que tiene la posibilidad de desplazar los componentes en tres dimensiones y permitir el análisis para un posterior desarrollo de la

fabricación. Se utilizaron herramientas computacionales de diseño CAD (Autodesk Inventor 2018) para modelar las características mecánicas, de geometría y ensamble de los sistemas mecánicos desarrollados.

También, se definieron los materiales para los sistemas mecánicos de la impresora 3D. Se analizó el uso del prototipado en 3D para las piezas de unión de los ejes, soportes de los rodamientos y de los motores paso a paso (aquellos que dan el desplazamiento de los ejes y del extrusor (Autodesk)). La Universidad Santo Tomás, Tunja cuenta con una impresora 3D que funciona bajo el principio de fabricación mediante filamento fundido (FFF). Esto significa que el filamento, está hecho de materiales termoplásticos, pasa a través de un extrusor que eleva su temperatura hasta la fusión, lo cual permite la distribución del material en la plataforma, según el movimiento del extrusor en las direcciones X, Y, y Z (Blandón & Rojas, 2015).

Este tipo de fabricación (FFF) permite el uso de materiales termoplásticos como el ABS y el PLA, los cuales cuentan con características y propiedades diferentes que se pueden adaptar según la aplicación deseada.

A) Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)

Es un producto derivado del petróleo con un punto de fusión igual o mayor a los 215 °C. Presenta valores de resistencia a la flexión de 97 GPa, soporta altas temperaturas (QuimiNet, 2006) y permite

el uso de tratamientos posteriores para obtener mejores acabados y geometrías.

B) Ácido Poliáctico (PLA)

Es un termoplástico biodegradable que se obtiene de productos como el maíz, la remolacha, el trigo, la yuca y otros productos ricos en almidón. Tiene una resistencia a la flexión de 80 GPa, soporta temperaturas altas y cierto grado de humedad. Posee la ventaja de que algunas propiedades químicas y mecánicas se pueden mejorar de acuerdo al proceso de fabricación que tenga (Hxx, 2015). Este material no genera gases nocivos durante el proceso de deposición, y no permite tratamientos térmicos posteriores a la fabricación.

Tabla 4.
Propiedades mecánicas, térmicas y reológicas del ABS y PLA

Polymer	ABS	PLA
Break Elongation (mm)	4,94	5,13
Elongation at Break (%)	7	7
Break Load (N)	186,3	254,16
Break Strength (Mpa)	9,7	13,24
MFI (g/10 min)	8,76	13,52
Glass Transition Temp (°C)	109,76	62,57
Young's Modulus (Mpa)	175	47,9
Heat Capacity Rate (J/g)	1,36	1,47

Fuente: Ranvijay Kumar et. Al. *On the 3D printing of recycled ABS, PLA and HIPS thermoplastics for structural applications.*

Teniendo ambos materiales como opción de fabricación, y según lo observado en la Tabla 4., se identificó que el PLA tiene mejores propiedades mecánicas, sobre las probetas de estudio, en comparación al ABS (Kumar, Singh, & Farina, 2018). Además,

el ABS al ser un producto derivado del petróleo genera contaminación y su costo se eleva aproximadamente tres veces al de PLA. Como consecuencia de esto, se elige el PLA como material de fabricación, sin embargo, se buscaron alternativas para mejorar estas propiedades y hacer más resistente el material, (Serna, Rodríguez, & Albán, 2011), ya que el ABS tiene mayor dureza y resistencia a los golpes (Bourabah, 2020).

De esta manera, se identificó que la impresión con mayor porcentaje de relleno (Pacheco, 2019) y en "Honeycomb" (forma de panal de abejas), mejora considerablemente la resistencia a los esfuerzos del PLA. Esto se debe a que la distribución de material se hace en ambas direcciones y no linealmente, evitando que los esfuerzos transversales provoquen deformaciones, grietas y/o fracturas en la pieza (Ebel & Sinnemann, 2014). Así, se logra obtener las características deseadas para el material de fabricación de las piezas de la impresora.

Tabla 5.

Propiedades mecánicas del ABS y el PLA, dependiendo de la densidad de impresión

Material y Densidad de Relleno	Esfuerzo Máximo (MPa)	Módulo de Elasticidad (Mpa)	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Elongación (%)
ABS-40%	14,58	1776,33	3,334	0,76
ABS-80%	21,64	2158,68	8,774	1,17
PLA-40%	21,11	2490,32	5,125	0,82
PLA-80%	26,78	2799,81	9,092	0,98

Fuente: Pacheco, Gustavo. *Análisis de tracción de probetas impresas en 3D mediante deposición de hilo fundido de PLA, ABS y PLA/MLO.*

Una vez elegido el material para el prototipado rápido de las piezas, se elige el material de las barras de la estructura. Se

plantea la implementación de un material que tenga gran dureza, resistencia, y que su peso no tenga consecuencias negativas sobre la estructura, como un sobre-esfuerzo para los motores o valores de fricción mayores que afecten la impresión. Teniendo en cuenta estas necesidades, se seleccionaron perfiles de aluminio, ya que cumplen con las características deseadas. Además, que se evidencia la aplicación de este material y su efectividad en diseños previamente ejecutados (Valarezo & Romero, 2016). Un factor determinante es la fácil accesibilidad al material en la ciudad de Tunja, su manejo y adaptación, es decir, la maleabilidad y ajuste mediante máquinas por arranque de viruta (torno, fresadora), y herramientas manuales. A su vez, se determinó el uso de ejes en acero inoxidable, para las guías de los rodamientos en los tres ejes de movimiento de la impresora. El acero inoxidable presenta ventajas de un mantenimiento sencillo y efectivo, mayor vida útil, baja rugosidad superficial y resistencia a la corrosión (Ashby & Jones, 2008).

Finalmente, en lo referente a los sistemas electrónicos de control y comunicación de la impresora, se hará uso de un controlador estandarizado y externo a la misma desarrollado en el grupo de investigación, de forma paralela al subproyecto del diseño mecánico que se aborda en este artículo. El controlador utiliza como elementos fundamentales una tarjeta Arduino Mega 2560, con una placa RAMPS 1.4 específica para el control de movimiento y extrusores de impresoras 3D por FDM. Para obtener una

mayor potencia debido al tamaño de la impresora, el controlador incorpora drivers para motores paso a paso de tipo industrial TB6600, que son más robustos y permiten la operación de motores de mayor potencia NEMA 23, que fueron seleccionados para cada uno de los grados de movimiento de la impresora. La interconexión entre la impresora y el controlador se realizará a través de conectores estandarizados GX16-4 y cable apantallado específicos para máquinas CNC, que facilitan el proceso de instalación de la impresora. Es importante mencionar que dentro de los requerimientos de diseño de la estructura mecánica de la impresora se encuentra la compatibilidad con este controlador ya disponible. En la Fig. 2. se observa el controlador modular de la impresora.

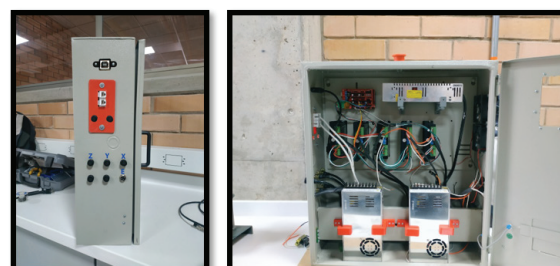


Fig. 2. A) Vista frontal del controlador de la impresora 3D. b) Vista lateral del controlador de la impresora 3D. Fuente: Autor

Una demostración de la estrategia que se implementa en la investigación para reducir los costos de implementación se muestra en la Fig. 3. Consiste en un mejoramiento del mecanismo de extrusión del filamento de impresión. Se utilizaron piezas comerciales de bajo costo como el motor y el rodamiento, piezas prototipadas e impresas en el laboratorio (piezas de color amarillo), y se fabricó el cilindro de arrastre del filamento, mediante el

torno. Esta unión de dispositivos cumple una óptima funcionalidad y refleja la estrategia llevada a cabo para reducir el costo reemplazando partes de alta relevancia que componen una impresora, por materiales de bajo costo y disponibilidad local o con facilidad de fabricación con los recursos disponibles.

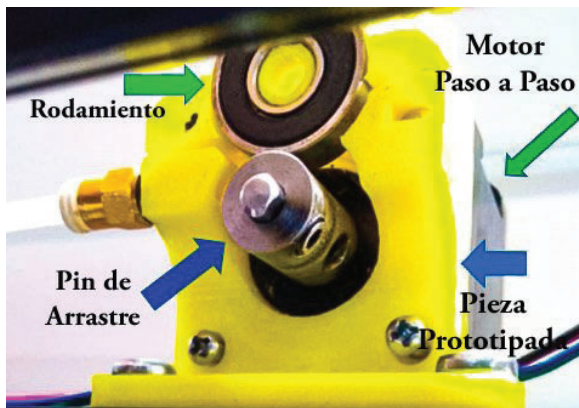


Fig. 3. Motor de arrastre del filamento de PLA.
Fuente: Autor del Proyecto

III. DESARROLLO

A) Diseño CAD

Para fabricar las piezas que componen los sistemas y subsistemas mecánicos, fue necesario hacer un diseño CAD que permitiera evidenciar su geometría, función y utilidad. Cada pieza de este diseño, se realizó mediante el software Autodesk Inventor, en donde se hizo el ensamble de todos los componentes de la impresora. Se implementaron perfiles de aluminio 20x40, como material de soporte de la estructura, ya que es un material liviano y estructuralmente resistente.

Las piezas de unión fueron diseñadas para ser fabricadas en la impresora 3D, debido a su geometría personalizada. Ya que, en comparación, al elaborarlas en máquinas convencionales significa un costo elevado y una destreza sobre las mismas con la que no se cuenta, a falta de capacitación. Además, se toma provecho de la disponibilidad de esta máquina en el laboratorio, pero teniendo en cuenta su limitación dimensional y la impresión de algunas geometrías.

En los bocetos preliminares, se observaron correcciones y mejoras necesarias para un funcionamiento óptimo, como los refuerzos de las piezas de unión. En la Fig. 4, se observa el diseño final.

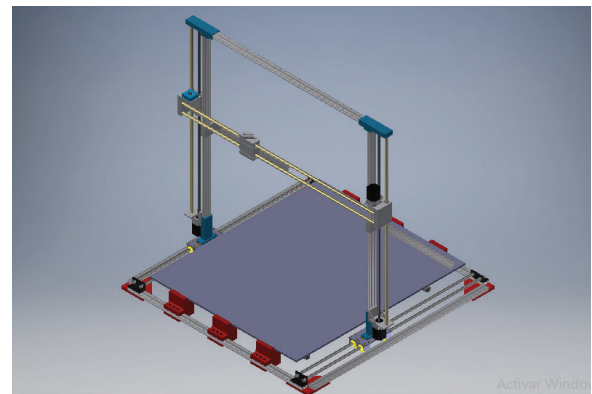


Fig. 4. Diseño CAD de la estructura de la impresora.
Fuente: Autor del proyecto

El objetivo principal es dar mejor estabilidad a la impresora y mayor rango de movimiento en los 3 ejes, con diferentes soportes para cada sección de la máquina (Fig. 5).

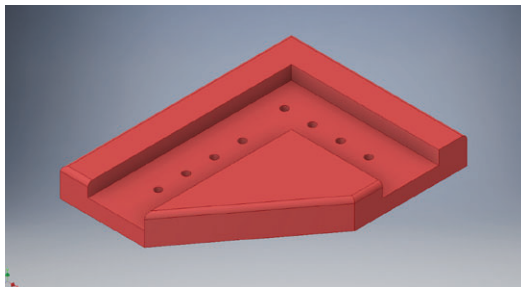


Fig. 5. Pieza de soporte de los perfiles de la estructura.
Fuente: Autor del proyecto

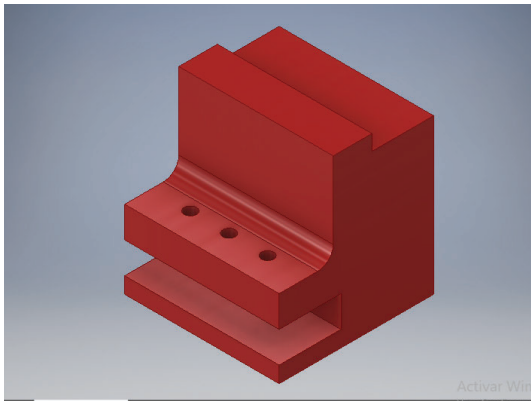


Fig. 6. Pieza de soporte de la cama de impresión.
Fuente: Autor del proyecto

La unión de las barras de aluminio mediante las piezas en PLA (Fig. 7.) permite que el movimiento en cada eje sea restringido y no haya desalineación al momento de desempeñar su función, brindando estabilidad en la estructura. Como se observa en la figura, esta pieza une la guía del eje Z con el apoyo diagonal de los perfiles superiores, lo que conlleva que no presente vibraciones en las demás direcciones.

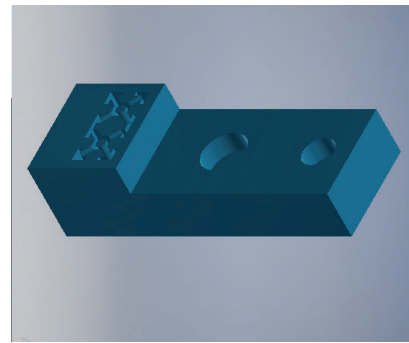


Fig. 7. Pieza de ensamble del eje Z de la impresora.
Fuente: Autor del proyecto

Para el desplazamiento lineal en cada eje, se diseñaron las piezas para su posterior prototipado. Para el eje Z se diseñó el componente que se observa en la Fig. 8. Esta permite el ensamble del eje donde será situado el extrusor (eje X), con los tornillos y ejes verticales del eje Z (acero inoxidable).

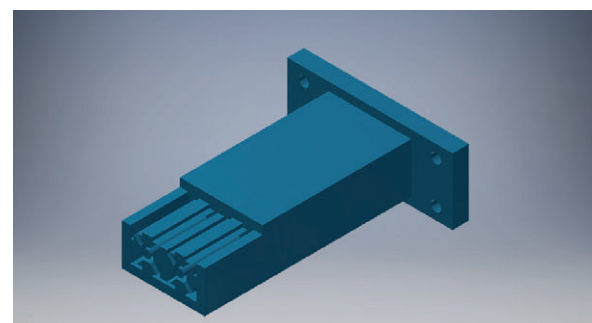


Fig. 8. Soporte de las guías de los ejes X y Z.
Fuente: Autor del proyecto

La transmisión de movimiento se realiza, para los ejes X y Y, a través de poleas y correas tipo GT2. Para el eje Z se utilizaron dos tornillos trapezoidales de 8 mm, acoplados directamente al eje de los motores (son de tipo paso a paso NEMA 23 de 425 Oz.in). Esta distribución aprovecha el espacio para cada movimiento y componente, que se desempeñe como una impresora práctica, y cómoda para

los usuarios. El diseño y análisis mecánico se hizo conociendo los complementos electrónicos y de programación, los cuales se incorporarán después del ensamblaje del dispositivo.

El sistema de transmisión de potencia se diseñó según los resultados del QFD, donde la velocidad de impresión es un factor que reviste gran importancia. La velocidad máxima requerida en el diseño es de 130 mm/s en sus ejes x y y, donde se realizan los movimientos principales, mientras que en z se requiere mayor precisión y su velocidad no es crítica por su desplazamiento ascendente durante el aporte de cada capa de material. Teniendo en cuenta lo anterior es recomendable usar un sistema de polea y correa sincrónico para los ejes x y y, mientras que para el eje z se usará el sistema de tornillo de potencia. Adicionalmente es necesario tener en cuenta la masa que debe mover el sistema, la cual se determinó por medio de un diseño preliminar de la estructura, así como por los datos ofrecidos en catálogos, del peso de motores y piezas estándar, dando como resultado una masa aproximada de 30 kg, para desplazar el eje x; el eje y y z desplazan menor masa.

Teniendo en cuenta los requerimientos iniciales de diseño y los datos obtenidos anteriormente, se procede a calcular el sistema de transmisión y selección de sus componentes. Según los catálogos consultados de poleas sincrónicas, la más pequeña de ellas cuenta con 12 ranuras

para un paso de 2 mm o 16 ranuras para uno de 3 mm. Con la carga calculada y un factor de seguridad de 1,75, se determina que la correa más adecuada es de paso 3 mm y 800 dientes, referencia 3MR 2400, determinada por la distancia entre centros de las poleas. Esta correa puede soportar un torque de hasta 2,25 N.m, suficiente para desplazar la masa calculada con el factor de seguridad seleccionado. El motor seleccionado para cumplir con los requerimientos de torque, velocidad y control es un motor de paso STP-MTR-23055 con carcasa NEMA-23, unido a una polea 3MR-16S-06 de aluminio por medio de un acople flexible, para garantizar el desplazamiento de la masa en un régimen de funcionamiento normal para el motor.

Para el eje y, se seleccionaron componentes semejantes a los del eje x, ya que este eje mueve menos masa. Esto se determinó para que el mantenimiento del equipo no aumente su complejidad en cuanto a la diversidad de pieza, se estandarizan para tener un stock reducido. En el eje z se tiene una carga de 10 kg y el mismo factor de seguridad, la velocidad no es un factor crítico en este sistema, pero si la precisión y permanencia en una altura determinada. El sistema que mejor cumple con estas características es la transmisión por tornillo, por lo cual se selecciona una transmisión con tornillos trapezoidal de 8 mm, paso de 2 mm y una tuerca de bronce. La carga de diseño es muy pequeña para los valores límite de este tornillo que se aproximan a los 4000 N.

B) Análisis del Perfil

Se comprobaron y se establecieron los planteamientos del diseño, principalmente, la estabilidad de la estructura, con un análisis sobre el perfil de aluminio. Las cargas se establecieron en la viga superior, donde el soporte de las cargas estáticas es crítico.

Para determinar el valor de estas fuerzas es necesario conocer la cantidad (en metros) de perfil que se necesita para suplir la necesidad, el peso por cada metro (kg/m) indicado en los catálogos del fabricante y el valor de aceleración de la gravedad, que es $9,81 \text{ m/s}^2$ en el sistema internacional. Se aplica la ecuación (1) para poder conocer el valor de la fuerza ejercida por los perfiles, que se mide en Newtons (N):

$$F_1 = \text{cantidad} * \text{peso} * g \quad (1)$$

Además, para determinar la fuerza que actúa en la estructura, como lo es el peso de los componentes mecánicos y electrónicos, tal y como sucede en este caso con motores paso a paso, extrusor, rodamientos, elementos de sujeción, y demás, es necesario saber el peso de éstos, el cual se encuentra en la hoja técnica o en el catálogo comercial.

También, conocer el valor de la aceleración de la gravedad (valor usado anteriormente). La ecuación (2) indica la forma de determinar la fuerza de estos componentes.

$$F_2 = \text{peso} * g \quad (2)$$

La carga total presente en la estructura es de un valor de .

Para complementar el análisis, se determina el esfuerzo máximo al que está sometida la barra que soporta mayor carga, es decir la barra del eje Y. Este componente del perfil de aluminio 20x40, recibe el peso de la estructura y estimando que sobre este, van soportados los ejes en acero inoxidable con los rodamientos, los cuales permiten el movimiento de la estructura superior. Para definir el esfuerzo máximo se utilizó la fórmula (3). Donde fue necesario calcular la carga sobre el perfil, reacciones en sus apoyos, par torsional sobre la barra, y momento de inercia.

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{M \cdot c}{I} \quad (3)$$

Donde, $M \rightarrow$ momento máximo

$c \rightarrow$ distancia y del punto de inercia del perfil
 $I \rightarrow$ Momento de inercia del perfil

Se determinó un esfuerzo máximo de 10,43 MPa al cual está sometida la barra de aluminio. Este valor no supera el límite de fluencia del material de 130 MPa, valor para la aleación de aluminio 6063 T5 (Ashby & Jones, 2008). Se concluye que es un valor de esfuerzo permitido y que no causará una deformación permanente, o rupturas, que tengan consecuencia en la estructura.

C) Fabricación

Actualmente, el proyecto se encuentra en una etapa de conformado, como se aprecia en la Fig. 10. La calibración

y el mantenimiento de la impresora encargada de la fase de prototipado, se hizo con la finalidad de garantizar un desempeño óptimo de la máquina en ejecución.

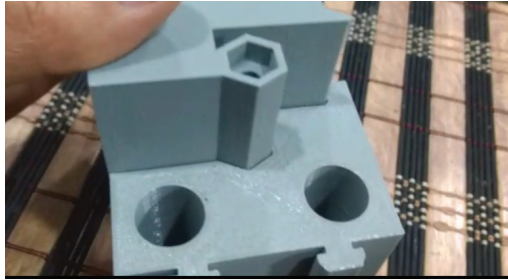


Fig. 10. Impresión de la pieza de soporte de los ejes.

Fuente: Autor del proyecto

Una vez impresas la totalidad de las piezas, se hará el ensamblaje con los perfiles de aluminio, y la distribución de componentes comerciales planteados. De esta manera pasa a una etapa de pruebas y validación de su funcionamiento, mejoras o modificaciones que surjan.

D) Impresoras en el Mercado

Teniendo el diseño, se estiman los recursos físicos y económicos que se necesitarán para la construcción de la máquina. Se determina si es factible, en comparación a las impresoras que se encuentran en el mercado |, de características similares. Para esto, se hizo una revisión bibliográfica de impresoras 3D, primando especificaciones técnicas y su valor económico. En la Fig. 11. se observa una impresora 3D de la marca Zortrax.



Fig. 11. Impresora 3D Zortrax M200.
Fuente: Dynamo Electronics

Las especificaciones del fabricante indican que la capacidad volumétrica de impresión es de 345 x 360 x 430 mm (Dynamo Electronics, 2017), es decir, aproximadamente una tercera parte de la que se encuentra en proceso de fabricación. Además, su costo duplica el estimado para el proyecto.

Agregado a esto, las impresoras que cumplen con una capacidad de impresión de 1 m³, se encuentran en sectores industriales y organizaciones especializadas como la NASA, lo cual eleva su valor comercial y dificulta su obtención. Se tiene en cuenta que estas impresoras industriales tienden a tener mejor precisión y efectividad en cuanto a la ejecución de geometrías complejas. Por lo que sus resultados no se pueden comparar directamente con la que se quiere construir. Sin embargo, aporta como precedente de una máquina de estas dimensiones.

Estas afirmaciones nos permiten conocer el alcance del proyecto, en cuanto a las características de la impresora, ya que,

para propiedades similares, los modelos no son asequibles al público general.

IV. RESULTADOS

Los diseños CAD realizados, permiten evidenciar que es posible fabricar una impresora 3D didáctica de gran escala, manteniendo un costo relativamente bajo comparado con las impresoras comerciales de prestaciones similares. Esto se logra utilizando el prototipado rápido para la mayoría de piezas del ensamble. Esto se puede afirmar ya que, al ser un diseño detallado, personalizado y con bajas tolerancias, la manufactura convencional no permite ciertas secciones de las piezas, o tendría que fabricarse con otros equipos más especializados (máquinas CNC), elevando los costos del proyecto.

Se evidencia la importancia de las piezas diseñadas por su relevancia, siendo el punto de unión de los ejes y del armazón general del ensamble. La ventaja del material para estas piezas es su buena resistencia a esfuerzos cortantes y tangenciales, y una reducción de peso y costo considerable.

Además, se destaca la viabilidad que tiene el ensamble de las piezas con elementos roscados y de unión temporal, para garantizar su funcionamiento, y evitar un cambio general de la máquina por defectos. Y brindar una disponibilidad alta al mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo, al que se normalmente se exponen este tipo de dispositivos.

La fabricación de esta máquina, se proyecta con el fin de contribuir a los proyectos de la facultad, ya que se podrán realizar piezas personalizadas, diseñadas a criterio de los estudiantes y docentes. Estos proyectos se limitan, por falta de tiempo, destreza e incluso disponibilidad de las máquinas dificultan su realización en máquinas convencionales por arranque de viruta. Esto permite que la comunidad se integre tempranamente en conocimientos de prototipado rápido, y se amplíen a lo largo de su estancia académica, para que, al salir al mundo laboral, se tengan buenas bases sobre este tipo de manufactura.

V. DISCUSIÓN

La ejecución de este proyecto de investigación deja el planteamiento del prototipado 3D aplicado en la elaboración de distintas piezas y elementos. Esto quiere decir, que es posible construir una impresora 3D utilizando prototipado rápido como principal recurso en cuanto a la manufactura.

Es posible elaborar otro tipo de proyectos. En áreas como ingenierías y arquitectura el uso de diferentes materiales está presente siempre para la elaboración de los trabajos de aula. En el caso de la ingeniería mecánica se recurre principalmente al uso de aceros, aleaciones de aluminio y otros metales, para fabricar los prototipos y montajes; a diferencia de arquitectura en donde el uso de materiales como polímeros, cerámicos, papel, entre otros, resulta ser el común para la elaboración de

maquetas y diseños. Estos materiales, generan desperdicios, y sobrantes, por lo que la implementación de la impresión 3D en estos campos sería de mayor provecho, y brindaría una solución que contribuye al reciclaje. El PLA es un material derivado de almidones (biodegradable), y proporciona la dureza y resistencia necesaria en diversas de las aplicaciones ya mencionadas. Además, estéticamente, los colores y distintas presentaciones de este material, aportan buena presentación a las piezas.

Para lograr esto, es necesario capacitar a los estudiantes y docentes, en conocimientos de la máquina y de modelado en 3D. Sabiendo que es una herramienta de aplicación de gran escala a nivel industrial, contribuirá a la actualización del conocimiento de nuevas técnicas, mejoras en la calidad de los proyectos, disminución del tiempo de ejecución de los mismos y se generarán menos desperdicios de material.

VI. CONCLUSIONES

El uso de la impresora 3D permite optimizar, facilitar la manufactura y la calidad de las piezas, manteniendo un costo asequible en comparación con impresoras comerciales de prestaciones similares.

El material que se utilizó para las piezas según su requerimiento, tiene buenas propiedades como resistencia a esfuerzos cortantes y tangenciales, reducción de peso y óptimo costo.

También, el ensamble tiene facilidad de ajustar las piezas con elementos de unión temporal, contribuyendo a la metodología de mantenimiento sin afectar los componentes del equipo.

Un diseño personalizado y con bajas tolerancias solventa la fabricación de piezas con geometrías complejas, disminuyendo costos de fabricación en comparación con la manufactura convencional por arranque de viruta.

La ventaja de la implementación de un material biodegradable como el PLA, es que su temperatura de fusión es más adecuada para una cama fría, es un material inoloro, a comparación con el ABS, tiene una amplia gama de colores, es fácil de utilizar y se adapta para realizar el acabado deseado sobre el objeto o pieza que se vaya a fabricar.

La impresora 3D será una herramienta que contribuye el crecimiento de la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomás en Tunja, ya que, además de contribuir a la manufactura de piezas, permite el aprendizaje de espacialidad, codificación G, programación electrónica y control. Esto se aplica ampliamente en la industria, en maquinaria CNC, donde el conocimiento de código G es fundamental.

El prototipado rápido plantea una idea de espacialidad del área de trabajo, hacer pruebas para comprender su funcionamiento. Éstas mismas pruebas serían costosas en un centro de mecanizado CNC y tiene un alto riesgo

de afectar la máquina, la herramienta o la integridad del operario, si no se realiza con la precaución y supervisión adecuada. De esta manera, se puede ver la aplicación industrial y no solo enfocada a los proyectos de investigación y de aula, como parte de un aprendizaje experimental.

VII. REFERENCIAS

- [1] Ashby, M., & Jones, D. (2008). *Materiales para ingeniería Vol.1*. Madrid: Reverté.
- [2] Autodesk. (s.f.). *Software para impresión 3D: ¿Qué es la impresión 3D?* Obtenido de <https://www.autodesk.mx/solutions/3d-printing>
- [3] Blandón, S., & Rojas, Á. (21 de Octubre de 2015). Diseño y construcción de una plataforma de impresión 3D robusta y flexible bajo estándares open hardware y open source. Santiago de Cali. *Memorias 2015: IV Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica y Automatización - CIIMA 2015 (1)*.
- [4] Blázquez, P., Orcos, L., Mainz, J., & Sáez, D. (2018). Propuesta metodológica para la mejora del aprendizaje de los alumnos a través de la utilización de las impresoras 3D como recurso educativo en el aprendizaje basado en proyectos. *Psicología, Conocimiento y Sociedad* 8(1), 162-193.
- [5] Bourabah, J. (24 de Febrero de 2020). PLA vs ABS: comparación de filamentos para impresión 3D. Obtenido de <https://all3dp.com/es/1/pla-vs-abs-comparacion-impresion-3d/>
- [6] Derré, M., Santolaria, J., & Brosted, F. (2014). Diseño de una impresora 3D DLP. *Repositorio digital Universidad de Zaragoza*. Proyecto Fin de Carrera, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Zaragoza.
- [7] Dynamo Electronics. (2017). *Impresora 3D Zortrax M200*. Obtenido de <https://www.dynamoelectronics.com/tienda/impresora-3d-zortrax-m200/>
- [8] Ebel, E., & Sinnemann, T. (2014). Fabrication of FDM 3D objects with ABS and PLA and determination of their mechanical properties. *RT e journal*, 2-4.
- [9] Hxx. (12 de Marzo de 2015). *Impresión 3D: Materiales*. Obtenido de <http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/>
- [10] Kumar, R., Singh, R., & Farina, I. (2018). On the 3D printing of recycled ABS, PLA and HIPS thermoplastics for structural applications. *Emerald Insight* (2), 115-137.
- [11] Pacheco, G. (2019). Análisis de tracción de probetas impresas en 3D mediante deposición de hilo fundido de PLA, ABS y PLA/MLO. *Repositorio Digital Universidad Politécnica*

- Salesiana, sede Cuenca. Tesis (Ingeniero Mecánico), Universidad Politécnica Salesiana; Cuenca, Ecuador, 2019.
- [12] QuimiNet. (12 de Enero de 2006). *QuimiNet*. Obtenido de <https://www.quiminet.com/articulos/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs-descripcion-propiedades-y-aplicaciones-4433.htm>
- [13] Roach, D. J., Hamel, C. M., Dunn, C. K., Johnson, M. V., Kuang, X., & Qi, H. J. (2019). The m4 3D printer: A multi-material multi-method additive manufacturing platform for future 3D printed structures. *Additive Manufacturing*, 29, 100819.
- [14] Rúa, E., Jiménez, F., Gutiérrez, G., & Villamizar, I. (2008). Impresión 3D como herramienta didáctica para la enseñanza de algunos conceptos de ingeniería y diseño. *Ingeniería*, 23(1), 70-83.
- [15] Sagrado, M. (18 de Julio de 2014). *Cómo montar una impresora 3D. Parte 2: La estructura básica*. Obtenido de <http://www.teknlife.com/practico/como-montar-una-impresora-3d-parte-2-la-estructura-basica/>
- [16] Serna, L., Rodríguez, A., & Albán, F. (2011). Ácido Poliáctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones. *Ingeniería y Competitividad*, 5(1), 16-27.
- [17] Valarezo, A., & Romero, M. (2016). Diseño y construcción de una impresora 3D de plástico. *Repositorio Digital Universidad San Francisco de Quito*, 22-28. Tesis (Ingeniero Mecánico), Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias e Ingenierías; Quito, Ecuador, 2016.
- [18] Void Create. (07 de Febrero de 2016). *Impresora 3D: Mecánica y estructura*. Obtenido de <https://voidcreate.wordpress.com/2016/02/07/impresora-3d-mecanica-y-estructura/>