

Development of a 3D Printer with Dual Extrusion Head for Industrial Applications

Desarrollo de impresora 3D con doble cabezal de extrusión para su uso en aplicaciones industriales

Jefferson Solarte ¹, Alejandro Hoyos ², Francisco Mercado ³, Álvaro Rojas ^{4*}

¹ Universidad Autónoma de Occidente, Facultad de Ingeniería, Grupo de investigación en tecnología para la manufactura (GITEM); ejsolarte@uao.edu.co

² Universidad Autónoma de Occidente, Facultad de Ingeniería, Grupo de investigación en tecnología para la manufactura (GITEM); alhoyos@uao.edu.co

³ Universidad Autónoma de Occidente, Facultad de Ingeniería, Grupo de investigación en tecnología para la manufactura (GITEM); fmercado@uao.edu.co

^{4*} Universidad Autónoma de Occidente, Facultad de Ingeniería, Grupo de investigación en tecnología para la manufactura (GITEM); ajrojas@uao.edu.co

Recibido: 20/09/2024

Aceptado: 02/11/2024

Fecha de Publicación: 27/11/2024



Derechos de autor: © 2024

Resumen: La manufactura aditiva (MA) se utiliza para la fabricación de prototipos, esto se debe principalmente a que los materiales comúnmente utilizados en estas tecnologías son termoplásticos de bajo rendimiento mecánico. Es por eso que se busca desarrollar una impresora 3D de grado semi-industrial de tecnología FDM con el fin de ampliar el servicio de impresión hacia el sector industrial; para esto se cuenta con la alianza estratégica de la empresa IP3D S.A.S que viene trabajando no solo en la construcción y comercialización de impresoras 3D sino también en prestar servicios de impresión y dar a conocer las bondades de la tecnología de impresión 3D. Uno de los mayores problemas para entrar al sector industrial es el alto costo de las impresoras que permiten obtener piezas de alto desempeño, mientras que las impresoras comercialmente asequibles se limitan a producir piezas de bajo desempeño que las limita a prototipos y elementos decorativos. Sin embargo, cada vez se pueden adquirir más fácilmente materiales poliméricos avanzados en filamento para impresión 3D que permiten obtener esos niveles de desempeño que se requieren para aplicaciones finales, pero no se cuentan con muchos sistemas de impresión que puedan procesarlos por las altas temperaturas y control necesarios. De esta manera se propone realizar una investigación en los materiales y parámetros de procesos para entender las particularidades de estos materiales avanzados y poder desarrollar un sistema de impresión que permita procesarlos y obtener piezas impresas que respondan a las exigencias de la industria.

Palabras clave: Manufactura aditiva; Polímeros de alta resistencia; Extrusor dual; Manufactura aditiva industrial; impresión 3D.

Abstract: Commonly, Additive manufacturing (AM) is used for prototyping due to the low performance of thermoplastic materials that are used in these technologies. Therefore, developing a semi-industrial Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printer is pursued to extend printing services into the industrial sector. This development is carried out with IP3D S.A.S, a strategic partnership engaged in constructing and commercializing 3D printers, providing printing services, and showcasing the advantages of 3D printing technology. One of the significant challenges in entering the industrial sector is the high cost of printers that can produce high-performance parts. Affordable printers are typically limited to generating low-performance components, restricting their use to prototypes and decorative items. However, the increasing availability of advanced polymer filament materials for 3D printing enables the attainment of desired performance levels for end-use applications. Nevertheless, there remains a shortage of printing systems capable of processing these materials due to high temperatures and robust control parameters requirements. Consequently, this study proposes an investigation into material properties and process parameters to comprehend the unique characteristics of these advanced materials. The goal is to develop a printing system capable of processing these materials and generating printed components that meet the rigorous demands of industry. Through this research, a pathway is envisioned to bridge the gap between available 3D printing technologies and the emerging potential of advanced polymer materials, facilitating their integration into industrial applications.

Keywords: Additive manufacturing; High Performance Polymers; Dual extruder; Industrial Additive Manufacturing; 3D printing.

DOI: <https://doi.org/10.57173/ritc.v1n18a11>

1. Introducción

Manufactura aditiva

La manufactura aditiva (MA) o impresión 3D se refiere a un conjunto de técnicas en las cuales se deposita material progresivamente para alcanzar la geometría deseada de un objeto, es por esta razón que esta tecnología ha sido ampliamente utilizada en el prototipado rápido [1]; sin embargo, debido a las necesidades del mercado se ha convertido en una metodología, capaz de abordar la producción de componentes y objetos complejos de manera eficiente y precisa [2].

En sus inicios, las impresoras 3D industriales eran limitadas a enormes y voluminosas máquinas que conllevaban costos exorbitantes. Sin embargo, en los últimos años, el panorama ha cambiado drásticamente, ya que el mercado se ha inundado con máquinas de MA, debido al desarrollo a su aplicación en diferentes campos del conocimiento, esto ha dado como resultado la creación de 7 técnicas de MA; Foto polimerización; Extrusión de Material; Inyección de Materia; Inyección de aglutinante; Fusión de cama de polvos; Deposición directa de energía; Fabricación de objetos laminados [3]. Esta evolución ha permitido que se investigue e incursione en soluciones para el sector industrial, llevando a cabo una transición hacia un formato más compacto y asequible [2].

Dentro de la técnica de extrusión de material, el modelado por deposición fundida (FDM) o también conocida como Fabricación por Filamento Fundido (FFF) es una de las técnicas más ampliamente difundidas en la actualidad dentro del ámbito de la impresión 3D, ha revolucionado la fabricación y el diseño de objetos en diversos sectores. Este proceso innovador parte de la utilización de polímeros que son fundidos y depositados selectivamente sobre una plataforma de construcción, siendo el filamento continuo uno de los materiales más utilizados en esta técnica. Existen una amplia gama de materiales disponibles para satisfacer requerimientos específicos, como el PETG, TPU, y el PA6, entre muchos otros. Cada uno de estos materiales posee propiedades únicas, como flexibilidad, resistencia química, transparencia o conductividad térmica, lo que los hace ideales para aplicaciones diversas y exigentes [4-5].

Como marco de referencia para plataformas de impresión semi-industrial se identificaron las impresoras comerciales de la Tabla 1, con ello se evidenció que muchas de las impresoras cuentan con temperaturas de trabajo alrededor de los 300°C en los extrusores y hasta 150°C en la base de impresión y algunas cuentan con control de temperatura del chamber (cabina de impresión) de 100°C, pero cabe resaltar que los precios son elevados en comparación con las impresoras de escritorio como las Ultimaker pero que trabajan con materiales básicos como ABS y PLA.

Tabla 1. Comparativa de las impresoras industriales o semi industriales más vendidas en el año 2023 según el portal ANIWAA de Francia [6].

BRAND	PRODUCT	BUILD SIZE	EXTRUDER TEMP	COUNTRY	PRICE
<u>Prusa Research</u>	<u>Original Prusa i3 MK3S</u>	250 × 210 × 210 mm	300°C	Czech Republic	\$999
<u>BCN3D Technologies</u>	<u>Sigma D25</u>	420 × 300 × 200 mm	300°C	Spain	\$3,995
<u>Raise3D</u>	<u>Pro3 Plus</u>	300 × 300 × 605 mm	300°C	United States	\$7,249
<u>Ultimaker</u>	<u>Ultimaker S7</u>	330 × 240 × 300 mm	-	Netherlands	\$8,299

<u>INTAMSYS</u>	<u>FUNMAT PRO 310</u>	305 × 260 × 260 mm	300°C	China	\$8,700
<u>Markforged</u>	<u>Onyx Pro</u>	320 × 132 × 154 mm	-	United States	\$9,600
<u>Stratasys</u>	<u>F120</u>	254 × 254 × 254 mm	-	United States	\$12,000

Con la información presentada se identificó una oportunidad de desarrollar una impresora que pueda alcanzar mayores temperaturas y procesar materiales avanzados de ingeniería que puedan responder a una aplicación industrial, con componentes relativamente económicos, que permita ampliar el servicio de impresión 3D para aplicaciones más exigentes. El reto de llevar algunas características de los sistemas industriales más costosos a sistemas de escritorio resulta no solo interesante por los beneficios económicos sino que exige entender cómo mejorar los sistemas de extrusión, qué materiales utilizar en el equipo y qué propiedades se pueden esperar de los objetos impresos que puedan cerrar la brecha entre los métodos tradicionales de fabricación como la inyección de plásticos y los obtenidos por manufactura aditiva de filamento fundido, mejor que en las impresoras de escritorio comunes que actualmente sufren de un desempeño mecánico reducido entre un 48% y un 70% [7].

Adicionalmente se encontró que los materiales más utilizados en aplicaciones de ingeniería son PP, PC, PA, HIPS y PEEK [8-9], por tal razón estos son los materiales que se esperan poder caracterizar y probar con el desarrollo de la investigación. A continuación, se presentan algunas características de dichos materiales.

Poliamida (PA): comúnmente conocida como nylon, es un polímero con una excelente resistencia mecánica, alta tenacidad y una baja absorción de humedad. Estas características hacen que el PA sea un material destacado para la impresión 3D, especialmente en aplicaciones que requieren piezas resistentes, duraderas y de alta precisión. Además, el PA se ha destacado en el desarrollo de aplicaciones industriales, donde su capacidad para soportar cargas y esfuerzos mecánicos es esencial. Al imprimir con PA, es fundamental ajustar parámetros de impresión, como la temperatura de extrusión y la velocidad de impresión, para obtener piezas con una excelente calidad superficial y resistencia [7,10].

Polipropileno (PP): es otro material ampliamente utilizado en la impresión 3D, reconocido por su alta resistencia química, baja densidad y flexibilidad. Es particularmente adecuado para la fabricación de piezas que necesitan ser livianas y que estarán en contacto con sustancias químicas agresivas. Sin embargo, imprimir con PP puede ser un desafío debido a su alta contracción y baja adhesión entre capas. Para mejorar la calidad de impresión y evitar problemas de warping, es común utilizar plataformas de construcción calefactoras y ajustar los parámetros de enfriamiento y retracción durante la impresión [4,10,11].

Poliestireno de alto impacto (HIPS): es un material ampliamente empleado como material de soporte en impresión 3D, especialmente cuando se trabaja con materiales como el ABS. El HIPS es soluble en limoneno, lo que permite eliminar los soportes de manera más sencilla y precisa, dejando la pieza final con una excelente superficie. Este material se caracteriza por su buena resistencia al impacto y su facilidad para imprimir, lo que lo convierte en una opción popular para la fabricación de prototipos y modelos complejos [10-12].

Polycarbonato (PC): es conocido por su alta resistencia al impacto, transparencia y propiedades dieléctricas. Estas cualidades lo hacen especialmente adecuado para aplicaciones donde se requiere una gran resistencia y transparencia óptica. Sin embargo, imprimir con PC puede ser un desafío debido a su alta temperatura de fusión y su

tendencia a generar warping. Para obtener resultados óptimos, es fundamental utilizar impresoras 3D con sistemas de control de temperatura precisos y ajustar adecuadamente los parámetros de impresión, como la velocidad de extrusión y la temperatura de la plataforma [10,13].

Poliéter-éter-cetona (PEEK): es conocido por su resistencia a temperaturas extremadamente altas, su excelente resistencia química y su excepcional durabilidad. Estas características lo hacen especialmente adecuado para aplicaciones en entornos exigentes, como la industria aeroespacial, automotriz y médica. Su capacidad para mantener su integridad estructural incluso a altas temperaturas lo convierte en un candidato atractivo para aplicaciones donde se requiere estabilidad dimensional y resistencia a condiciones ambientales hostiles [14].

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

Con el propósito de crear una plataforma versátil y apta para la impresión de materiales avanzados de ingeniería, se emprendió un proceso de rediseño integral de una máquina, como la que se presenta en la Figura 1. Los requisitos fundamentales que guiaron este rediseño incluyeron la necesidad de lograr un sistema completamente cerrado, con el fin de tener un control preciso de la temperatura ambiental, y la implementación esencial de un sistema de doble extrusor.

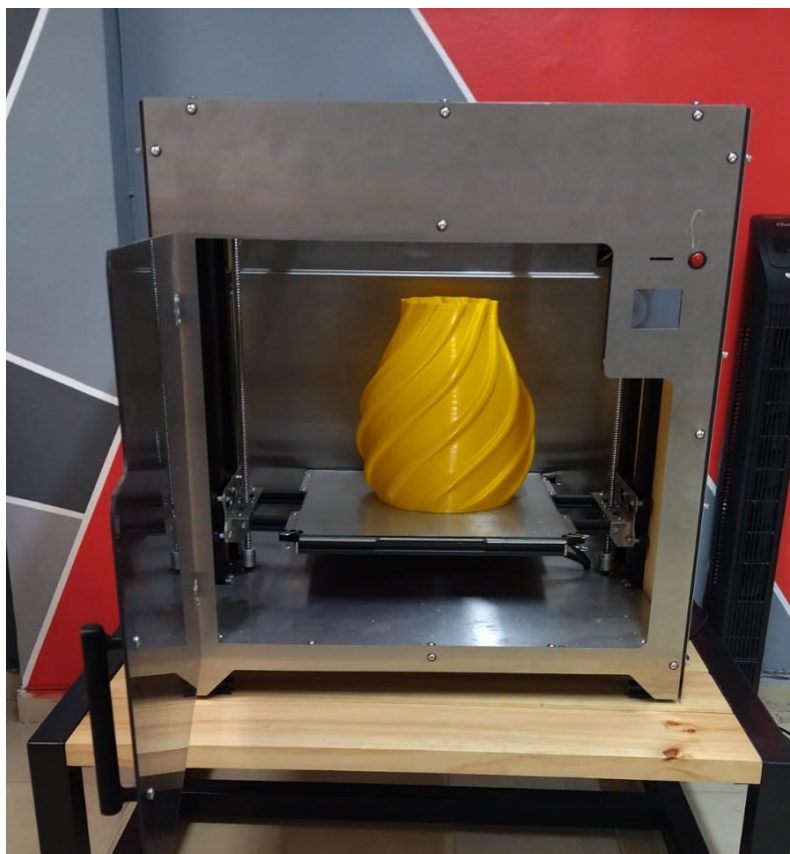


Figura 1. Sistema preliminar de impresión para rediseño, Pegasus standard.

Adicionalmente, para llevar a cabo los test de resistencia mecánica se utilizó la maquina Instron 3366 [15], el cual es un equipo de prueba de materiales y componentes utilizado comúnmente en laboratorios de investigación y desarrollo, así como en entornos industriales. Se emplea para realizar pruebas de tensión y compresión en diversos

materiales y productos con el fin de evaluar sus propiedades mecánicas y determinar su resistencia bajo diferentes condiciones de carga como la que se muestra en la Figura 2a. También fue necesario el equipo Lonroy Equipment A004 [16], como el que se observa en la Figura 2b, el cual sirve para realizar pruebas de impacto tipo IZOD y Charpy principalmente en plásticos densos, nylon reforzado, polímeros reforzados con fibra de vidrio, cerámicos y cuenta con una energía de impacto de máximo 5.5J.



Figura 2. Maquinas utilizadas para test de materiales. (a) Instron 3360 [15], (b) Lonroy Equipment A004 [16].

2.2 Métodos

Los materiales seleccionados para la caracterización se escogieron en base a sus propiedades únicas y sus aplicaciones potenciales en la impresora semi-industrial. Estos materiales representan una variedad de características, como resistencia térmica, estabilidad dimensional y resistencia mecánica, que son fundamentales para la evaluación del rendimiento y la idoneidad de la impresora en entornos industriales y con materiales de alta temperatura.

Estos materiales fueron utilizados para fabricar probetas que posteriormente se sometieron a pruebas de tensión y ensayo de impacto, según las normas ASTM D638 tipo IV [5,17] y ASTM D256 IZOD [18-19] respectivamente.

Las pruebas de tensión ASTM D638 tipo IV se llevaron a cabo para evaluar las propiedades mecánicas de los materiales bajo cargas de tracción uniaxial usando la maquina Instron 3366 [15]. Estas pruebas proporcionan información valiosa sobre la resistencia, la elasticidad, la deformación y la capacidad de carga de los materiales. Los resultados obtenidos a partir de estas pruebas permiten comparar y determinar las diferencias en el comportamiento de los materiales seleccionados y su idoneidad para aplicaciones de impresión 3D en la impresora semi-industrial.

Por otro lado, las pruebas de ensayo de impacto ASTM D256 tipo IZOD se realizaron para evaluar la resistencia al impacto y la tenacidad de los materiales frente a fuerzas de impacto usando la máquina de pruebas Lonroy equipment A004 [16]. Estas pruebas son cruciales para determinar la capacidad de los materiales para resistir golpes y choques, lo que es especialmente relevante en aplicaciones donde se requiere que las piezas impresas sean resistentes y duraderas.

En el contexto de la impresión de las probetas destinadas al ensayo de impacto, se determinó que la evaluación de la resistencia al impacto de una pieza impresa depende significativamente de varios parámetros clave. Estos parámetros incluyen la densidad de relleno, el patrón de relleno y la orientación de impresión. Para llevar a cabo esta evaluación, se procedió a fabricar las probetas de acuerdo con las directrices establecidas en la norma ASTM D256 y la documentación previamente recopilada [18]. Las dimensiones específicas de las probetas se presentan detalladamente en la Figura 3a. Se optó por utilizar una densidad de relleno del 100% además, se eligió un patrón de relleno plano rectilíneo, que es conocido por su uniformidad. La orientación de impresión es un factor clave en la evaluación de la resistencia al impacto, se seleccionó de acuerdo con la configuración mostrada en la Figura 3b.

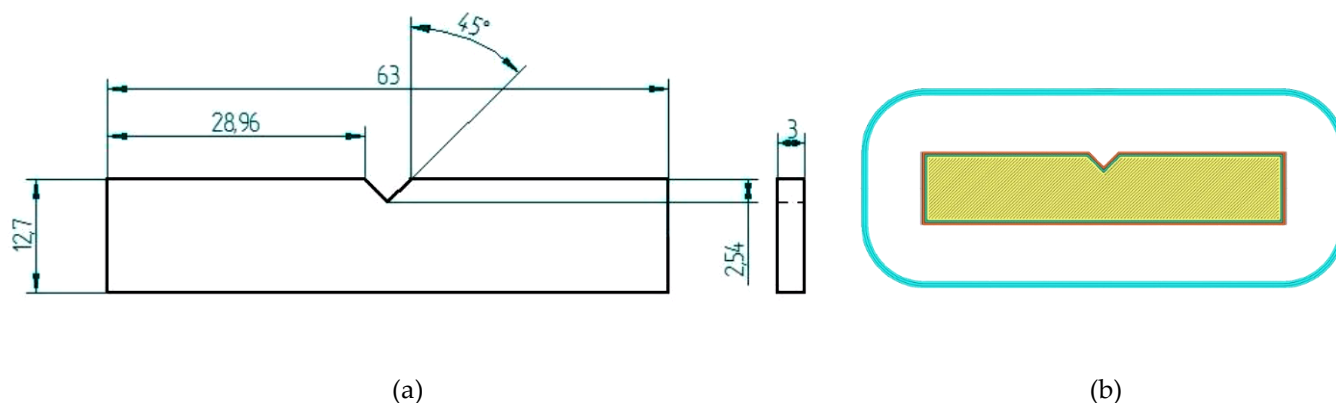


Figura 3. Probetas ASTM D256 para ensayo de impacto. (a) Parámetros de la probeta [20], (b) orientación de impresión, software laminador.

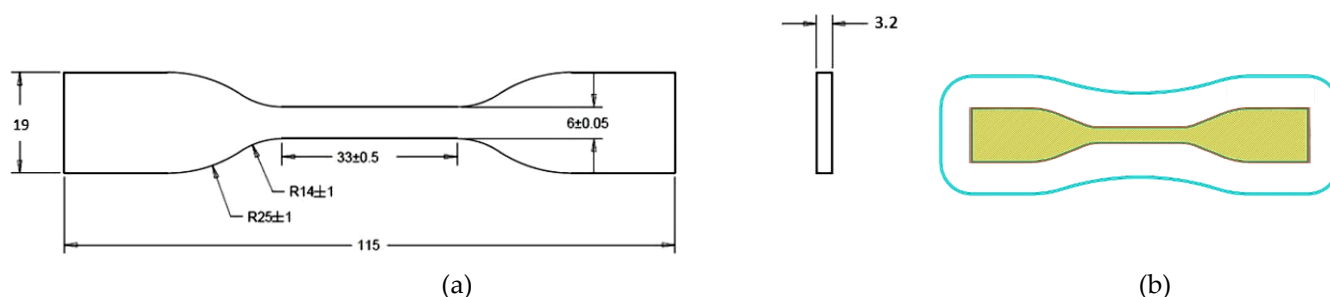


Figura 4. Probetas ASTM D638 tipo IV para ensayo de tensión. (a) Parámetros de la probeta [21], (b) orientación de impresión, software laminador.

En el proceso de manufactura de las probetas destinadas al ensayo de tensión, se implementó un modelo de diseño que se ajustó al estándar ASTM D638, específicamente el tipo IV, con las dimensiones y atributos descritos en la Figura 4a. Para lograr una confección acorde con los requerimientos y basada en la documentación previa [5,7], se identificaron como parámetros críticos tres factores esenciales: la densidad de relleno al 100%, un patrón de relleno longitudinal y una orientación de impresión conforme se presenta en la Figura 4b.

3. Resultados

3.1 Plataforma de impresión

La reingeniería de la máquina se enfocó en optimizar su estructura y funcionalidad para satisfacer las demandas específicas de la impresión en materiales de ingeniería avanzados. La creación de un entorno completamente cerrado se convirtió en una premisa fundamental para controlar de manera precisa y estable la temperatura interna. Esto se logró mediante la implementación de un sistema de recinto cerrado, lo que permitió mantener las condiciones térmicas requeridas para la impresión exitosa de materiales que exigen un rango específico de temperaturas de proceso. Esta característica resulta crucial para prevenir deformaciones y defectos en las piezas impresas, garantizando la alta calidad y precisión de los productos finales. Adicionalmente es muy importante que el sistema de extrusores y cama caliente puedan alcanzar temperaturas más altas que las impresoras de escritorio.

Un segundo requisito estratégico del rediseño involucró la incorporación de un sistema de doble extrusor. Este sistema se diseñó y adaptó para permitir la deposición de múltiples materiales en una misma impresión, brindando la capacidad de crear estructuras compuestas y funcionales. Parte del trabajo realizado se puede observar en la Figura 5, la introducción del sistema de doble extrusor abre la puerta a un amplio espectro de aplicaciones, permitiendo la combinación de diferentes materiales con propiedades complementarias y la creación de estructuras de mayor complejidad y funcionalidad. Esto tiene un impacto significativo en la versatilidad de la plataforma de impresión y en su capacidad para atender a diversas necesidades de diseño y producción en ingeniería.



Figura 5. Plataforma preliminar desarrollada con doble extrusor

3.2 Cinemática

Para establecer el fundamento de la configuración de dos extrusores independientes, se adoptó un sistema de movimiento por correas como el que se ilustra en la Figura 6. Esta cinemática permite la manipulación del eje Y a través de los motores A1 y A2, tal como se refleja en la ecuación (1), donde estos motores operan en sincronía. El desplazamiento en el eje X está definido por la ecuación (2), y es apreciable que los motores B1 y B2 controlan los extrusores X1 y X2, respectivamente en conjunto con los motores A.

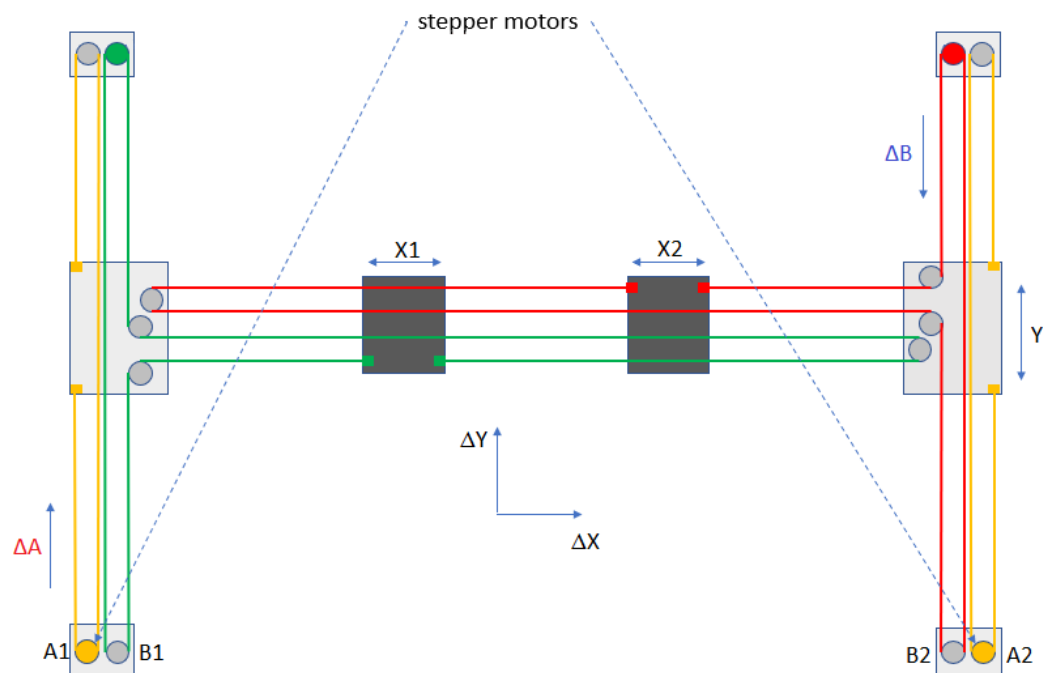


Figura 6. Diagrama del sistema doble de extrusores independientes mediante correas [22].

$$\Delta Y = \Delta A \quad (1)$$

$$\Delta X_n = \Delta A + \Delta B_n \quad (2)$$

A continuación, se presentan las Tablas 2, 3, 4 y 5 con los resultados parciales de las pruebas a los materiales propuestos para caracterizar y ser puestos a prueba en impresiones controladas con la impresora desarrollada.

Tabla 2. Resultados pruebas de tensión PA.

	Módulo (Automático de Young) [MPa]	Deformación a la Rotura (Estándar) [%]	Esfuerzo de tracción a la Rotura (Estándar) [MPa]
1	664,99	111,89	13,04
2	663,28	111,21	13,41
3	661,99	111,35	14,37
4	651,72	111,22	14,33
5	632,75	111,26	14,20
6	665,57	110,97	13,03
7	688,03	111,45	13,00
8	635,35	107,85	13,48
9	662,79	111,90	13,76
Media	658,50	111,01	13,62
Desviación estandar	16,82	1,23	0,57

Tabla 3. Resultados pruebas de tensión PP.

	Módulo (Automático de Young) [MPa]	Deformación a la Rotura (Estándar) [%]	Esfuerzo de tracción a la Rotura (Estándar) [MPa]
1	800,83	36,61	19,94
2	846,37	34,79	18,35
3	825,01	28,38	24,76
4	819,12	43,34	22,00
5	875,6	40,31	22,45
7	845,2	51,43	13,00
Media	863,19	48,96	19,14
Desviación estandar	77,39	26,95	4,50

Tabla 4. Resultados pruebas de tensión PEEK.

	Módulo (Automático de Young) [MPa]	Deformación a la Rotura (Estándar) [%]	Esfuerzo de tracción a la Rotura (Estándar) [MPa]
1	1955,76	18,08	87,01
2	1957,52	16,25	89,28
3	1877,37	17,92	90,09
Media	1930,22	17,42	88,79
Desviación estandar	45,77	1,01	1,60

Tabla 5. Resultados pruebas de impacto PEEK.

	Break (J)	Strength (kJ/m ²)	Strength (J/m)
1	0,8773	5,13598	66,665
2	0,8152	4,86167	62,6183
3	0,7219	4,28582	54,9442
4	0,7842	4,64822	59,6366
5	0,8596	5,03601	65,5688
6	0,762	4,51938	58,4807
Media	0,80	4,75	61,32
Desviación estandar	0,06	0,32	4,47

4. Discusión

El estado presente del proyecto representa un paso significativo hacia la realización del objetivo principal. En este momento, se concentra el esfuerzo en el desarrollo de la cabina de calefacción y se han realizado modificaciones en la estructura para simplificar las adaptaciones propuestas. La configuración de extrusores dobles ha sido implementada de manera integral, como se detalla en la Figura 5. Sin embargo, aún es necesario completar la implementación del software requerido para lograr un control independiente de estos elementos. En esta área, ya se ha progresado al explorar soluciones open source ya existentes. En relación a los materiales que se pretenden caracterizar, con el propósito de validar la máquina como una impresora apta para materiales avanzados de ingeniería, se cuenta con datos parciales derivados de pruebas de tensión aplicadas a PA, PP y PEEK. De estos, destaca el PEEK, que presenta un esfuerzo máximo de tracción aproximadamente 8 veces superior al de los otros materiales caracterizados, como se evidencia con un valor de 89MPa. De las pruebas de tensión de probetas impresas en 3D

con PA se pudo obtener un valor de resistencia de 13,62 MPa, lo cual contrastado con 80 MPa que son los resultados reportados para este mismo material mediante la técnica de inyección [7], apoya la idea de la menor resistencia mecánica que se obtiene de una pieza mediante impresión 3D. Esto mismo aplica para el caso de los demás materiales utilizados en el estudio, con el PP se obtuvo un resultado de 19,14 MPa en impresión 3D contra 27 MPa [23] mediante inyección y con PEEK se obtuvo 88,79 MPa en este estudio, pero en resultados previos mediante inyección se reportó 100 MPa [14]. En términos de los resultados obtenidos de las pruebas de impacto, actualmente se cuenta únicamente con datos para el PEEK. Por lo tanto, no se dispone de un punto de comparación con respecto a los demás materiales hasta este momento. Este factor enfatiza la necesidad de llevar a cabo evaluaciones exhaustivas para todos los materiales involucrados, a fin de establecer una base sólida para la comparación y la validación del enfoque. No obstante, se puede evidenciar que el resultado aquí obtenido para el PEEK es de 61,32 J/m en prueba de impacto versus 94 J/m mediante otras técnicas de fabricación [24].

5. Conclusiones

Este trabajo ha avanzado de manera satisfactoria para desarrollar la plataforma de doble extrusor para materiales avanzados, lo cual permitiría sentar un precedente local en la implementación de esta tecnología, trayendo un beneficio para la comunidad académica y la empresa IP3D con la que se ha formado esta alianza para la investigación. Los resultados preliminares de las pruebas mecánicas a los materiales sugieren que los materiales seleccionados ofrecen mejores propiedades que los normalmente utilizados en impresoras de escritorio. El control de la temperatura en la cabina de impresión requiere un sistema muy bien aislado, con un diseño óptimo para el flujo del aire y materiales aislantes que recubran y eviten la transmisión rápida del calor interior al exterior.

Agradecimientos: A la empresa IP3D con la que se formó la alianza para llevar a cabo este proyecto y en especial a Camilo Rodas por todos sus aportes para el rediseño de la máquina.

Referencias

- [1] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Compos. Part B Eng.*, vol. 143, pp. 172–196, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2018.02.012.
- [2] J. D. Prince, "3D Printing: An Industrial Revolution," <http://dx.doi.org/10.1080/15424065.2014.877247>, vol. 11, no. 1, pp. 39–45, Jan. 2014, doi: 10.1080/15424065.2014.877247.
- [3] ISO/ASTM, "ISO/ASTM 52900:2021(en), Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary," 2021. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en> (accessed Aug. 10, 2023).
- [4] R. B. Kristiawan, F. Imaduddin, D. Ariawan, Ubaidillah, and Z. Arifin, "A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters," *Open Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 639–649, Jan. 2021, doi: 10.1515/ENG-2021-0063/ASSET/GRAPHIC/J_ENG-2021-0063_FIG_003.JPG.
- [5] N. G. Tanikella, B. Wittbrodt, and J. M. Pearce, "Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing," *Addit. Manuf.*, vol. 15, pp. 40–47, May 2017, doi: 10.1016/J.ADDMA.2017.03.005.
- [6] ANIWAA, "Best professional 3D printers 2023: features, performance, price." <https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/best-3d-printer/> (accessed Aug. 07, 2023).
- [7] M. Lay, N. L. N. Thajudin, Z. A. A. Hamid, A. Rusli, M. K. Abdullah, and R. K. Shuib, "Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding," *Compos. Part B Eng.*, vol. 176, p. 107341, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2019.107341.
- [8] J. Kechagias, D. Chaidas, N. Vidakis, K. Salonitis, and N. M. Vaxevanidis, "Key parameters controlling surface quality and dimensional accuracy: a critical review of FFF process,"

- <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2032144>, vol. 37, no. 9, pp. 963–984, 2022, doi: 10.1080/10426914.2022.2032144.
- [9] E. Cuan-Urquizo, E. Barocio, V. Tejada-Ortigoza, R. B. Pipes, C. A. Rodriguez, and A. Roman-Flores, "Characterization of the Mechanical Properties of FFF Structures and Materials: A Review on the Experimental, Computational and Theoretical Approaches," *Mater.* 2019, Vol. 12, Page 895, vol. 12, no. 6, p. 895, Mar. 2019, doi: 10.3390/MA12060895.
- [10] ALL3DP, "Filamento para impresora 3D – Guía de compra de 2023 | All3DP." <https://all3dp.com/es/1/filamento-3d-filamento-impresora-3d/> (accessed Aug. 07, 2023).
- [11] N. Bachhar, A. Gudadhe, A. Kumar, P. Andrade, and G. Kumaraswamy, "3D printing of semicrystalline polypropylene: towards eliminating warpage of printed objects," *Bull. Mater. Sci.*, vol. 43, no. 1, pp. 1–8, Dec. 2020, doi: 10.1007/S12034-020-02097-4/METRICS.
- [12] R. Kumar, R. Singh, and I. Farina, "On the 3D printing of recycled ABS, PLA and HIPS thermoplastics for structural applications," *PSU Res. Rev.*, vol. 2, no. 2, pp. 115–137, Dec. 2018, doi: 10.1108/PRR-07-2018-0018/FULL/PDF.
- [13] S. Kannan and M. Ramamoorthy, "Mechanical characterization and experimental modal analysis of 3D Printed ABS, PC and PC-ABS materials," *Mater. Res. Express*, vol. 7, no. 1, p. 015341, Jan. 2020, doi: 10.1088/2053-1591/AB6A48.
- [14] C. Yang, X. Tian, D. Li, Y. Cao, F. Zhao, and C. Shi, "Influence of thermal processing conditions in 3D printing on the crystallinity and mechanical properties of PEEK material," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 248, pp. 1–7, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2017.04.027.
- [15] Instron, "3360 Series Dual Column Tabletop Models The Instron ® 3300 Series of mechanical testing systems provide simplicity, performance, and the highest level of quality needed for QC labs and production testing," 2018, Accessed: Aug. 08, 2023. [Online]. Available: www.instron.com
- [16] LONROY, "IZOD& Charpy Impact Tester LR-A004." <https://www.lonroy.com/product/izod-charpy-impact-tester-lr-a004/> (accessed Aug. 08, 2023).
- [17] INSTRON, "ASTM D638: The Definitive Guide To Plastic Tensile Testing | Instron." <https://www.instron.com/en/testing-solutions/astm-standards/astm-d638> (accessed Aug. 07, 2023).
- [18] N. P. Raut and A. B. Kolekar, "Experimental analysis of 3D printed specimens with different printing parameters for Izod impact strength," *Mater. Today Proc.*, vol. 80, pp. 156–162, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.11.029.
- [19] ZWICK, "ASTM D256 | Izod notched impact test plastics | ZwickRoell." <https://www.zwickroell.com/industries/plastics/thermoplastics-and-thermosetting-molding-materials/izod-notched-impact-strength-astm-d256/> (accessed Aug. 07, 2023).
- [20] M. R. Sanjay, G. R. Arpitha, L. Laxmana Naik, K. Gopalakrishna, and B. Yogesha, "Studies on Mechanical Properties of Banana/E-Glass Fabrics Reinforced Polyester Hybrid Composites," *J. Mater. Environ. Sci*, vol. 7, no. 9, pp. 3179–3192, 2016.
- [21] R. M. Singari, P. K. Arora, M. Sharma, V. Sharma, and K. Prateek, "Optimization of process variables to improve the mechanical properties of FDM structures You may also like Wear assessment of 3-D printed parts of PLA (polylactic acid) using Taguchi design and Artificial Neural Network (ANN) technique Meena Pant Optimization of process variables to improve the mechanical properties of FDM structures", doi: 10.1088/1742-6596/1240/1/012061.
- [22] 0xmarcelx0, "[FR] Markforged kinematics · Issue #12110 · MarlinFirmware/Marlin · GitHub." <https://github.com/MarlinFirmware/Marlin/issues/12110> (accessed Aug. 09, 2023).
- [23] Material Properties, "Polypropylene | Properties, Price & Application | Material Properties." <https://material-properties.org/polypropylene-properties-application-price/> (accessed Aug. 28, 2023).
- [24] Omnexus, "Polyether ether ketone (PEEK Plastic): Uses, Properties & Material Guide." <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyetheretherketone-peek-thermoplastic> (accessed Aug. 29, 2023).