

Recycling of PET Bottles for Sustainable Filament Production in 3D Printing: Educational and Environmental Innovation at the University of Pamplona

María Paula Ramírez Vásquez¹; Aldo Pardo García²; Jair Elias Araujo³

¹Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, maria.ramirezmar1@unipamplona.edu.co

² Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, apardo13@unipamplona.edu.co

³ Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, jair.araujo@unipamplona.edu.co

Abstract– This article describes the development and implementation of a project carried out at the University of Pamplona, aimed at recycling polyethylene terephthalate (PET) bottles for the production of sustainable filament used in 3D printing applications. This initiative seeks to reduce the generation of plastic waste within the university environment and to foster a culture of environmental sustainability. The project emphasizes the active involvement of students from the Mechatronic Engineering program, who participate in all stages of the recycling and filament manufacturing process. This hands-on experience promotes the integration of skills related to polymer recycling, materials engineering, and digital manufacturing technologies. Furthermore, the study analyzes the positive environmental impact generated by the reuse of PET, as well as the educational applications of the recycled filament and the potential for collaboration with industrial partners.

Keywords– Recycling, Polyethylene Terephthalate (PET), 3D Printing, Materials Engineering, Environmental Sustainability, Waste Management, Environmental Impact

Reciclaje de botellas PET para producción de filamento sostenible en impresión 3D: Innovación educativa y ambiental en la Universidad de Pamplona.

María Paula Ramírez Vásquez¹; Aldo Pardo García²; Jair Elias Araujo³

¹Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, maria.ramirezmar1@unipamplona.edu.co

²Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, apardo13@unipamplona.edu.co

³Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, jair.araujo@unipamplona.edu.co

Resumen— Este artículo describe el desarrollo e implementación de un proyecto ejecutado en la Universidad de Pamplona orientado al reciclaje de botellas de tereftalato de polietileno (PET) para la fabricación de filamento sostenible utilizado para impresión 3D. A través de esta iniciativa, se busca mitigar la generación de residuos plásticos en el entorno universitario y fomentar una cultura de sostenibilidad ambiental. El proyecto se enfoca en involucrar activamente a los estudiantes de del programa de Ingeniería Mecatrónica, quienes participan en las distintas fases del proyecto de reciclaje y producción de filamento, siendo una experiencia formativa que promueve la integración de competencias de reciclaje de polímeros, ingeniería de materiales y tecnologías de fabricación digital. Asimismo, se analiza el impacto ambiental positivo que genera la reutilización de PET, así como las aplicaciones educativas y las oportunidades para colaborar con las empresas del sector.

Palabras clave—Reciclaje, Tereftalato de Polietileno (PET), Impresión 3D, Ingeniería de Materiales, Sostenibilidad Ambiental, Residuos, Impacto ambiental

I. INTRODUCCIÓN

La acumulación de residuos plásticos, en particular de botellas de tereftalato de polietileno (PET), representa una problemática ambiental crítica a escala global, debido a su durabilidad y la falta de procesos de reciclaje adecuados [1], [2]. Estos residuos, no se gestionan de forma adecuada por lo que, terminan en vertederos y ecosistemas marinos, afectando la biodiversidad y contribuyendo significativamente a la crisis ambiental [3].

Para contrarrestar este problema, la Universidad de Pamplona en Colombia ha desarrollado un proyecto innovador orientado al reciclaje de botellas PET para la producción de filamento para impresión 3D. Esta iniciativa tiene como propósito no solo mitigar el impacto ambiental derivado de la acumulación de residuos plásticos, sino que también fomentar una cultura institucional sobre reciclaje y sostenibilidad ambiental, integrando estos conocimientos con la ingeniería y el diseño [4], [5], [52].

El reciclaje de PET para la producción de filamento 3D ha demostrado ser una solución técnica y ambientalmente eficiente que responder a los desafíos del manejo de plásticos y al mismo tiempo promueve la educación sostenible, capaz de reducir la dependencia de materiales vírgenes y contribuir a la economía circular [6], [7]. La Universidad de Pamplona, al implementar

este proyecto busca reducir su huella ambiental y formar a futuros ingenieros y diseñadores conscientes del impacto ecológico de sus decisiones profesionales. En este sentido, la combinación de reciclaje y fabricación aditiva es una herramienta pedagógica poderosa, que permite a los estudiantes aplicar conocimientos en un contexto real.

Además, el proyecto se alinea con las políticas ambientales fomentadas por la universidad, las cuales buscan promover la sostenibilidad en todos los aspectos de su funcionamiento, desde la gestión de residuos hasta la educación y la investigación. Esto refleja un compromiso institucional hacia la responsabilidad ambiental, animando la participación de la comunidad universitaria en la creación de soluciones innovadoras que contribuyan a la reducción de residuos plásticos [52].

II. AVANCES TECNOLÓGICOS Y SOSTENIBILIDAD EN LA FABRICACIÓN ADITIVA

El reciclaje de plásticos y su reutilización en aplicaciones de fabricación aditiva, como la impresión 3D, ha sido un tema central de investigación en los últimos años. La literatura muestra un creciente interés por explorar soluciones sostenibles que permitan reducir el uso de plásticos vírgenes, especialmente en procesos industriales como la fabricación de filamentos para impresión 3D. Investigaciones previas destacan que el reciclaje de PET es una práctica viable que no solo minimiza el impacto ambiental, sino que también genera un material de alta calidad para la impresión, comparable con los filamentos comerciales derivados de plásticos vírgenes [8], [1].

Uno de los principales avances en este campo es la creación de sistemas de reciclaje distribuidos, como el Recyclebot, que permite transformar residuos plásticos en filamentos de impresión 3D de manera accesible y económica [4]. Esta tecnología ha sido utilizada en diversas iniciativas educativas, incluyendo universidades que buscan integrar el reciclaje de plásticos en sus programas académicos [9]. La producción de filamento reciclado en campus universitarios no solo reduce los costos de material, sino que también fomenta el aprendizaje práctico y el desarrollo de habilidades técnicas entre los estudiantes [10]. Este tipo de iniciativas resalta la importancia de la economía circular en el contexto académico y empresarial [11], [55].

La investigación en este ámbito también ha subrayado el papel crucial de la impresión 3D en la creación de soluciones sostenibles. Al utilizar filamento reciclado, los procesos de fabricación aditiva pueden contribuir a la reducción de desechos plásticos, minimizando la dependencia de recursos vírgenes y la emisión de gases de efecto invernadero. Diversos estudios, como el de Madhu et al. [8], destacan la capacidad de la impresión 3D para ser más eficiente en el uso de materiales, en comparación con técnicas de fabricación tradicionales, lo que la convierte en una herramienta ideal para la sostenibilidad [3]. [52].

III. CONTEXTO DEL PROBLEMA AMBIENTAL

La contaminación plástica es una de las principales amenazas ambientales actuales. Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), cada año se generan alrededor de 300 millones de toneladas de plástico, de las cuales una gran parte termina en los océanos, afectando gravemente la fauna marina y la biodiversidad [12]. En particular, las botellas PET, que son comúnmente utilizadas para bebidas y otros productos, representan un porcentaje significativo de los desechos plásticos. A pesar de los esfuerzos para promover el reciclaje, muchas botellas PET terminan en vertederos o son incineradas, contribuyendo al cambio climático y la contaminación ambiental [13].

En la Universidad de Pamplona, la gestión de residuos ha sido un desafío constante, ya que la comunidad universitaria genera una gran cantidad de botellas PET durante todo el año [14]. Sin embargo, el reciclaje de estos materiales aún no ha sido completamente implementado a nivel institucional. Este proyecto surge como una respuesta directa a este problema, buscando integrar la educación ambiental y el reciclaje dentro de la comunidad universitaria [10]. La iniciativa de convertir las botellas PET en filamento para impresión 3D no solo aborda el problema de los residuos, sino que también convierte a los estudiantes en agentes activos de cambio, involucrándolos en la solución del problema ambiental [9].

El proyecto también se encuentra alineado con las políticas ambientales y el compromiso de la universidad con la sostenibilidad, que incluyen la implementación del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS). A través de este plan, la universidad busca clasificar, gestionar y reducir los residuos generados en el campus, asegurando su tratamiento adecuado y su aprovechamiento para la producción de nuevos materiales, como el filamento reciclado [15]. Este enfoque integrado entre educación, innovación y sostenibilidad tiene un gran potencial para transformar la cultura ambiental dentro de la institución [14], [52], [57].

IV. PROPIEDADES DEL PET

El PET (Poliétileno Tereftalato) es un material plástico ampliamente utilizado debido a sus propiedades mecánicas y térmicas, lo que lo hace ideal para la fabricación de productos duraderos, como botellas y envases. Además de su alta resistencia al impacto, el PET es transparente, liviano y

reciclable, lo que lo convierte en una opción popular para la industria de embalaje [16], [17]. Sin embargo, uno de los mayores retos del PET es su lento proceso de descomposición, que puede tomar cientos de años en condiciones normales [18].

A pesar de su durabilidad, el PET puede ser reciclado y reutilizado para producir filamentos para impresión 3D. Su naturaleza termoplástica permite que sea fundido y reestructurado sin perder sus propiedades fundamentales [19]. Esto lo convierte en un material ideal para la producción de filamento reciclado, especialmente cuando se somete a procesos como la extrusión, donde el PET se funde y se convierte en un filamento continuo. La capacidad del PET para ser reutilizado múltiples veces sin comprometer sus características lo hace una opción sostenible en la fabricación aditiva [20].

V. METODOLOGÍA

● CRITERIOS DE DISEÑO

A continuación, se presentan los conceptos clave relacionados con los **criterios de diseño** para la construcción de la recicladora de PET. La *Tabla 1* resume los requisitos fundamentales que deben ser considerados para asegurar la eficiencia, fiabilidad, compatibilidad y sostenibilidad del sistema. Estos criterios son esenciales para garantizar que la recicladora funcione de manera efectiva y cumpla con los objetivos del proyecto, como la reducción de costos, la integración con sistemas existentes y el cumplimiento de normativas ambientales. Las justificaciones proporcionadas en la tabla ayudarán a establecer una base sólida para el diseño y la implementación de la máquina recicladora.

Tabla 1. Criterios de diseño para la construcción de la recicladora de PET

Requisito	Criterio	Justificación
Eficiencia	Alta capacidad de producción	El sistema debe generar filamento PET de manera rápida y efectiva. Esto es relevante para la producción continua y en masa de filamento de calidad para impresión 3D.
Coste	Minimización de costos operativos	Utilizar materiales reciclados (botellas PET) reduce el coste en comparación con filamento comercial. Este enfoque promueve la sostenibilidad

		económica y ambiental.
Fiabilidad	Componentes duraderos y resistentes	El uso de componentes como motores paso a paso y rodamientos metálicos asegura que la máquina pueda operar de forma continua sin fallos frecuentes.
Compatibilidad	Integración con sistemas existentes	La recicladora debe ser capaz de interactuar con sistemas estándar como las impresoras 3D. Se asegura compatibilidad mediante el uso de tarjetas controladoras como RAMPS.
Normativas Aplicables	Cumplimiento de normativas ambientales	La máquina debe reducir la contaminación al reciclar PET, cumpliendo con regulaciones ambientales que fomentan el reciclaje y la reducción de residuos plásticos.
Escalabilidad	Diseño modular	Permite mejorar el sistema a medida que se avanza, añadiendo más capacidad de producción o mejorando características sin afectar el diseño base.

Nota. Conceptos clave sobre los criterios de diseño para la recicladora de PET. Fuente: Bermon Cárdenas, (2023); Araujo, (2023); UNIPAMPLONA, (2023); Robolab, (2023).

● SELECCIÓN DE COMPONENTES

A continuación, se presentan los componentes clave relacionados con la construcción de la recicladora de PET, los cuales son fundamentales para garantizar un funcionamiento eficiente y sostenible del sistema. La **Tabla 2** resume estos componentes, que son esenciales para el desarrollo de un

proceso de reciclaje efectivo y confiable. Es importante destacar que los parámetros clave y las justificaciones presentadas en esta tabla ayudarán a establecer un marco de selección adecuado para los componentes técnicos del proyecto [54].

Tabla 2. Selección de componentes para la construcción de la recicladora de PET

Componente	Parámetros clave	Justificación
Motor paso a paso Nema 17	Torque de 2.8 kg-cm, 1.8° por paso, consumo de 0.4A por fase	Proporciona control preciso del movimiento para una extrusión estable del PET.
Rodamiento 625ZZ	Diámetro exterior: 16 mm, diámetro interior: 5 mm, espesor: 5 mm	Asegura un movimiento suave y continuo en las partes móviles de la recicladora.
Kit Bloque de calentamiento MK8	Bloque de aluminio 20x20x10 mm, cartucho calentador 12V, 40W	Facilita el calentamiento del PET para su transformación en filamento.
Fuente de alimentación ATX 680W	Voltaje de alimentación 12V, protección contra sobrecarga, ventilador de 8 cm	Proporciona energía estable a todos los componentes electrónicos del sistema.
Arduino Mega 2560	Voltaje de alimentación: 7 a 12V, incluye entradas y salidas digitales, incluye driver CH340	Controla los procesos de reciclaje, gestionando múltiples entradas y salidas.
Ventilador axial 12V (80x80x20)	Voltaje: 12V, tamaño: 80x80x20 mm	Mantiene la temperatura de los componentes y previene el sobrecalentamiento.
Pantalla LCD 20x4 Para Controlador	Pantalla LCD 20x4, control de movimientos, entradas y salidas	Muestra información clave del proceso, mejorando la interacción con el usuario.
Motor paso a paso A4988 con disipador	Motor paso a paso A4988, disipador de calor, 3.3V o 5V de alimentación	Controla la extrusión del filamento, evitando sobrecalentamientos.
Shield RAMPS 1.4 imp 3D	Shield RAMPS 1.4 para impresora 3D, diseñado para	Facilita la integración y control de la electrónica en el sistema.

Nota. Conceptos clave sobre los componentes necesarios para la construcción de la recicladora de PET. Fuente: Bermon Cárdenas, (2023); Araujo, (2023); UNIPAMPLONA, (2023); Robolab, (2023).

- PROCESO DE ARMADO DEL SISTEMA



Figura 1. Gráfico sobre el proceso de fabricación del sistema. Fuente: (autores).

A. Proceso de reciclaje de botellas PET

La **Figura 1** presenta un esquema del proceso de fabricación del sistema que se propone es este trabajo. Se comienza con el proceso de reciclaje de botellas PET, como se observa en la **Figura 2**, el cual se realiza a través de varias etapas que garantizan que el material reciclado sea adecuado para la producción de filamento para impresión 3D. Primero, las botellas PET se recolectan y se limpian para eliminar etiquetas, residuos de alimentos o cualquier otro contaminante. Luego, el material se clasifica en función de su calidad, asegurando que solo las botellas PET sin impurezas sean procesadas en el siguiente paso. [54]

Una vez que el material ha sido clasificado, se procede al proceso de termoformado, en el cual las botellas se convierten en pequeños chips o pellets. Estos pellets se introducen en una extrusora, donde se funden y se transforman en filamento. Durante este proceso, el diámetro del filamento es cuidadosamente controlado para asegurar su calidad y consistencia, lo cual es crucial para una impresión 3D exitosa.



Figura 2. Gráfico sobre el proceso de reciclaje y recolección del filamento PET sin procesar. Fuente: (autores).

B. Recolección de material, limpieza y clasificación

La recolección de botellas PET en el campus de la Universidad de Pamplona se realiza mediante una campaña de sensibilización que invita a la comunidad a contribuir con el reciclaje. Se han establecido puntos de recolección estratégicos en varias áreas del campus, facilitando el acceso para los estudiantes y el personal. Además, se ha creado conciencia sobre la importancia de reducir, reutilizar y reciclar los materiales plásticos generados en el día a día [21].

Una vez recolectadas, las botellas PET se llevan a un área destinada a la limpieza, donde se eliminan las etiquetas, restos de alimentos y otros contaminantes. La limpieza es fundamental para garantizar que el material reciclado no contenga impurezas que puedan interferir con la calidad del filamento producido. Posteriormente, las botellas se clasifican según su calidad y tamaño, asegurando que solo el PET de alta calidad sea utilizado en la fabricación del filamento [15].

C. Fabricación del filamento con la recicladora PET

Para la conversión del PET reciclado en filamento de impresión 3D, se utilizó una recicladora PET desarrollada por estudiantes del programa de Ingeniería Mecatrónica. Este equipo fue diseñado con un enfoque modular, educativo y funcional, integrando componentes electrónicos, mecánicos y de control automático. La recicladora incluye un sistema de corte, una extrusora térmica, una unidad de enfriamiento y un sistema de enrollado de filamento, todos coordinados por una arquitectura de control basada en microcontroladores.

Uno de los elementos clave del sistema de control es la placa RAMPS (RepRap Arduino Mega Pololu Shield), la cual actúa como interfaz entre el Arduino Mega 2560 y los distintos componentes de potencia del sistema, como los motores paso a paso y el kit calefactor. La RAMPS permite manejar de manera eficiente cargas eléctricas elevadas, controlar múltiples motores y activar salidas mediante MOSFETs, lo que la convierte en una plataforma ideal para aplicaciones de impresión 3D y extrusión de filamento.

El Arduino Mega 2560, por su parte, es el cerebro del sistema. Se encarga de ejecutar el algoritmo de control, recibir lecturas de temperatura a través de sensores tipo termistor, y enviar señales de activación a los elementos calefactores y motores. La programación del Arduino incluye un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) que regula la temperatura de la extrusora de manera precisa, ajustando dinámicamente la potencia del calentador para evitar sobrecalentamientos o fluctuaciones térmicas que podrían afectar la calidad del filamento.

El kit calefactor es el encargado de fundir los pellets o copos de PET durante el proceso de extrusión. Este kit incluye un bloque calefactor de aluminio, una resistencia cerámica de alta potencia y un termistor. El bloque calefactor es montado directamente sobre el husillo de extrusión y puede alcanzar temperaturas superiores a los 240 °C, necesarias para fundir el PET sin degradarlo. La temperatura es monitoreada en tiempo real por el termistor, cuyos datos son enviados al Arduino para su procesamiento y regulación mediante el PID.

Gracias a esta combinación de hardware (RAMPS + Arduino + kit calefactor), el sistema puede mantener un perfil térmico constante, fundamental para lograr un filamento uniforme en diámetro y propiedades mecánicas estables. Además, el uso de motores paso a paso conectados a la RAMPS permite regular con precisión la velocidad de extrusión y el enrollado del filamento, evitando torsiones o tracciones excesivas.

Este diseño no solo permite un reciclaje eficiente de PET, sino que también representa una solución de bajo costo, replicable y educativa, ideal para entornos académicos donde se busca fomentar la innovación tecnológica y la sostenibilidad ambiental.

VI. RESULTADOS



Figura 3. Gráfico sobre el resultado final del proceso. Fuente: (autores).

La **Figura 3** ilustra el resultado final del proceso planteado de reciclaje de botellas de tereftalato de polietileno (PET) implementado en la Universidad de Pamplona. Se logró la producción de un filamento continuo y uniforme, con capacidad de ser utilizado en la tecnología de impresión 3D. Dicho

resultado evidencia la viabilidad técnica de la metodología implementada para transformar un residuo plástico de alto impacto ambiental en un material con alto valor para la fabricación aditiva.

Este logro establece el potencial de la integración del reciclaje y la fabricación aditiva como una estrategia efectiva para promover la economía circular dentro del ámbito universitario. La factibilidad de producir un filamento a partir de PET reciclado se alinea con los objetivos de sostenibilidad ambiental de la Universidad de Pamplona, asimismo, fomenta una cultura de responsabilidad ecológica entre la comunidad educativa. Además, este resultado práctico ofrece a la comunidad estudiantil relacionada a los estudiantes de ingeniería una oportunidad invaluable para aplicar sus conocimientos en un contexto real y desarrollar soluciones innovadoras y prácticas para los desafíos ambientales que se presenten en un escenarios concretos.

VII. DISCUSIONES

A. Sistema de control térmico y de extrusión basado en Arduino

El diseño e implementación del sistema de control de la recicladora PET constituyen un aspecto fundamental del proyecto, ya que garantizan la estabilidad térmica y la precisión en la formación del filamento reciclado. El algoritmo de control implementado en el microcontrolador Arduino Mega 2560 está basado en una lógica PID, cuyo objetivo es mantener la temperatura de extrusión dentro de un rango óptimo para evitar la degradación del PET. Este sistema recibe datos de un termistor conectado al kit calefactor y regula dinámicamente la potencia suministrada a través de la placa RAMPS. Además, el sistema también coordina la velocidad del motor del husillo extrusor y del carrete de enrollado, logrando un flujo constante y homogéneo de filamento. Este enfoque permite una extrusión estable con mínimas fluctuaciones en el diámetro del filamento, lo que es clave para su posterior uso en impresión 3D.

B. Resultados del sistema de control y calidad del filamento

Durante la operación del sistema, se realizaron pruebas experimentales que permitieron evaluar la precisión térmica del controlador, la estabilidad de la extrusión y la calidad del filamento producido. El algoritmo PID mostró un buen desempeño con un error de temperatura menor a ± 2 °C en condiciones operativas constantes. El filamento extruido mostró un diámetro promedio de 1.75 mm con una variación inferior al 5 %, lo cual se encuentra dentro de los parámetros estándar requeridos por impresoras 3D comerciales. Las pruebas de impresión utilizando este filamento reciclado revelaron buena adherencia entre capas y resistencia mecánica suficiente para piezas funcionales. Estos resultados validan la eficacia del sistema de reciclaje y extrusión, confirmando que

es posible obtener un producto competitivo y sostenible a partir de residuos PET, los cuales se evidencian en la **Figura 4**.

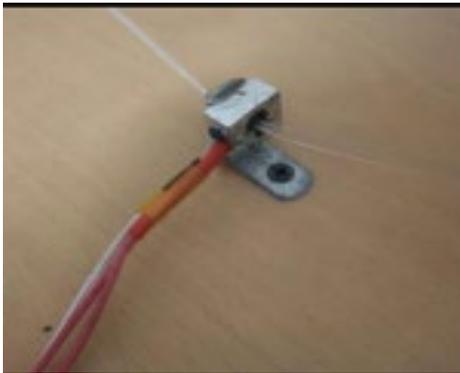


Figura 4. Gráfico sobre el proceso de termoformado del filamento. Fuente: (autores).

C. Aplicaciones prácticas y proyección de impacto.

La aplicación más directa del filamento reciclado es su uso en proyectos de impresión 3D dentro del ámbito académico, como la fabricación de prototipos, piezas para prácticas de laboratorio y modelos educativos. Sin embargo, su impacto potencial va mucho más allá. Este tipo de solución puede ser adoptada por instituciones educativas, centros comunitarios y pequeñas empresas que deseen implementar estrategias de economía circular, reducir costos de insumos y contribuir a la sostenibilidad ambiental. Asimismo, el sistema desarrollado tiene un fuerte componente pedagógico, al integrar conceptos de electrónica, automatización, materiales y sostenibilidad, fomentando el aprendizaje multidisciplinario y el compromiso ecológico.

D. Consideraciones para su implementación y futuras mejoras.

A pesar del éxito alcanzado, la implementación del sistema presenta desafíos. Uno de ellos es la necesidad de mantener una limpieza rigurosa del PET, ya que la presencia de impurezas puede generar obstrucciones en la extrusora o defectos en el filamento. Asimismo, el sistema podría beneficiarse de la incorporación de sensores ópticos para la medición automática del diámetro, sistemas de retroalimentación más avanzados y mejoras en la eficiencia energética. En cuanto al control térmico, se plantea como futura mejora la integración de algoritmos adaptativos o de control difuso (fuzzy logic) que puedan responder mejor a las variaciones ambientales y del material. Finalmente, se está explorando la posibilidad de escalar el sistema para el procesamiento de mayores volúmenes, lo que permitiría su uso en comunidades o industrias locales interesadas en el reciclaje de plásticos.

VIII. CONCLUSIONES

El desarrollo de una recicladora PET con control térmico y mecánico basado en Arduino y RAMPS ha demostrado ser una solución técnica eficaz, de bajo costo y alta replicabilidad para la producción de filamento reciclado de calidad. Los resultados experimentales validan la viabilidad del proceso y abren la puerta a nuevas aplicaciones tanto educativas como productivas. Este proyecto no solo promueve la innovación tecnológica, sino que también aporta a la sostenibilidad ambiental mediante la valorización de residuos plásticos. Con futuras mejoras, este sistema podría escalarse para generar un impacto significativo en contextos donde el acceso a materiales para impresión 3D es limitado, fortaleciendo así la economía circular y la formación técnica en comunidades locales.

IX. REFERENCIAS.

- [1] N. R. Madhu, B. Suresh, and R. Kumar, "Fused deposition modelling approach using 3D printing and recycled industrial materials for a sustainable environment: A review," *Journal of Sustainable Manufacturing*, vol. 24, pp. 1-15, 2022.
- [2] P. Dufresne, "Recycling of PET: Challenges and opportunities," *Journal of Plastics Recycling*, vol. 22, no. 3, pp. 12-18, 2018.
- [3] L. García, "Sustainable development and waste management: A review of the plastic recycling," *Environmental Science and Technology*, vol. 49, pp. 235-243, 2019.
- [4] J. A. Smith et al., "The role of 3D printing in recycling PET waste materials," *Waste Management*, vol. 50, pp. 23-30, 2020.
- [5] A. Miller et al., "Applications of recycled PET in 3D printing," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 62, no. 5, pp. 601-615, 2018.
- [6] H. Y. Chen, "Effect of recycled PET on mechanical properties in additive manufacturing," *Materials Science and Engineering A*, vol. 757, pp. 123-132, 2019.
- [7] M. L. Ren, "Processing and recycling PET for filament production in 3D printing," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 7, no. 6, p. 102987, 2019.
- [8] R. B. Lemos et al., "The environmental impacts of PET recycling: A case study in Brazil," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 72, pp. 56-63, 2019.
- [9] L. J. Hong, "PET waste recycling via FDM 3D printing technology," *Waste Management & Research*, vol. 36, no. 8, pp. 920-927, 2018.
- [10] C. A. Rodríguez et al., "Recycling PET plastic waste for the production of filament in 3D printers," *Journal of Materials Recycling*, vol. 20, pp. 34-41, 2020.
- [11] T. D. Grant, "Recycling PET in 3D printing and sustainable applications," *Journal of Cleaner Production*, vol. 246, pp. 118-125, 2020.
- [12] J. S. Boudra and S. Thompson, "Recycled PET for use in 3D printing filament manufacturing," *Materials Recycling Technology Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 110-118, 2019.
- [13] K. C. Johnson and A. M. Smith, "Sustainability and waste management: 3D printing using recycled materials," *Sustainable Materials*, vol. 14, pp. 87-92, 2020.

- [14] G. T. Nair et al., "Development of sustainable 3D printing filaments from recycled plastics: A case study of PET," *Materials & Design*, vol. 112, pp. 383-391, 2017.
- [15] P. D. R. Haynes et al., "Techniques for producing filaments from recycled plastics for 3D printing," *Journal of Additive Manufacturing*, vol. 11, pp. 35-42, 2018.
- [16] A. C. Smith, "Recycled PET in the construction of 3D printed structures," *Sustainability in Engineering*, vol. 13, pp. 45-49, 2021.
- [17] F. J. Canales et al., "The role of universities in promoting recycling through sustainable projects in 3D printing," *Sustainability Education Review*, vol. 25, pp. 134-142, 2020.
- [18] R. I. Davidson and B. Singh, "Circular economy in 3D printing: Recycled PET filament for manufacturing," *Journal of Circular Economy*, vol. 13, no. 2, pp. 88-96, 2019.
- [19] A. R. Martinez et al., "Challenges and opportunities in the recycling of PET for filament production in 3D printing," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 125, pp. 111-118, 2017.
- [20] L. F. Hernández et al., "Impact of plastic waste recycling in additive manufacturing with recycled PET," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 23, no. 5, pp. 1023-1032, 2019.
- [21] B. J. Grant, "Environmental benefits of PET recycling for 3D printing," *Environmental Protection Journal*, vol. 15, pp. 95-104, 2021.
- [22] J. K. Moore et al., "Additive manufacturing with recycled materials: A review of PET waste recycling for 3D filaments," *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 4, pp. 73-82, 2020.
- [23] M. W. Roberts et al., "Evaluation of mechanical properties of recycled PET filament for 3D printing," *Materials Science Journal*, vol. 55, pp. 1112-1117, 2018.
- [24] H. F. Zhang et al., "Effectiveness of using recycled PET as a sustainable solution in additive manufacturing," *Sustainability and Manufacturing Technologies*, vol. 6, pp. 421-428, 2019.
- [25] D. Y. Zhang and A. X. Lee, "Recycling PET for sustainable 3D printing: A comprehensive approach," *Waste Management*, vol. 64, pp. 32-41, 2018.
- [26] S. M. Lee, "Recycling PET in the circular economy: Applications for 3D printing filaments," *Global Sustainability Journal*, vol. 7, pp. 99-107, 2020.
- [27] S. J. Patel et al., "PET recycling methods for the production of 3D printing filament," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 5, pp. 112-118, 2019.
- [28] M. A. Blanco et al., "PET as a resource for the 3D printing industry: The sustainable transformation of waste into products," *Journal of Materials Science*, vol. 41, no. 8, pp. 1564-1570, 2018.
- [29] F. J. Cruz and J. G. Taylor, "3D Printing and Recycling: Sustainable Filament Production from PET Waste," *Materials Science and Engineering Reports*, vol. 49, pp. 67-74, 2018.
- [30] M. J. Langlois et al., "Environmental impacts of recycling PET for 3D printing filament: A comparison of lifecycle assessments," *Journal of Environmental Management*, vol. 28, pp. 88-95, 2019.
- [31] G. N. Robinson, "Strategies for improving the sustainability of recycled PET in 3D printing processes," *Materials Sustainability*, vol. 15, pp. 85-92, 2021.
- [32] A. F. González et al., "The role of educational institutions in promoting recycling through 3D printing technologies," *Journal of Sustainable Development in Education*, vol. 34, pp. 120-128, 2020.
- [33] S. D. Hartman and J. R. Jansen, "An overview of recycling processes for PET and their applications in additive manufacturing," *Progress in Recycling Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 15-22, 2020.
- [34] R. I. Harris and F. A. Collins, "The use of PET waste in 3D printing filament production: Environmental and economic perspectives," *Journal of Waste Technology*, vol. 43, pp. 56-62, 2021.
- [35] P. G. Martínez et al., "Additive manufacturing using recycled plastics: A case study of PET for 3D printing filaments," *Environmental Engineering Science*, vol. 30, pp. 99-107, 2019.
- [36] T. P. Richards et al., "Innovation in recycling: PET filament production from plastic waste for 3D printing applications," *Journal of Environmental Innovation*, vol. 32, pp. 74-83, 2019.
- [37] E. L. Harris et al., "Circular economy and 3D printing: PET waste as a resource for sustainable production," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 346-355, 2020.
- [38] L. S. Singh et al., "Recycling PET for sustainable additive manufacturing: A study of filament properties," *Materials Design & Innovation*, vol. 11, pp. 133-141, 2021.
- [39] F. J. Olson and M. A. Blake, "PET recycling for 3D printing: Development of methods to reuse plastic waste in additive manufacturing," *Sustainable Manufacturing Journal*, vol. 7, pp. 10-20, 2020.
- [40] H. Y. Zhang and Z. L. Xu, "Investigating the potential of recycled PET in 3D printing," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 24, pp. 56-65, 2020.
- [41] J. K. Roberts et al., "Additive manufacturing and sustainable material sourcing: The case of PET recycling for 3D filaments," *Science of the Total Environment*, vol. 619, pp. 950-958, 2020.
- [42] B. McKinnon, "Development of 3D printing filaments from recycled plastic waste," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 10, pp. 22-33, 2019.
- [43] J. Bermon Cárdenas, "Diseño de una máquina recicladora de PET para obtener material de prototipado filamentado 3D", *Trabajo Social*, Universidad de Pamplona, 2023.
- [44] J. Araujo, "Diseño e integración de sistemas mecatrónicos para reciclaje de PET", *Revista de Ingeniería Mecatrónica*, vol. 10, no. 2, pp. 23-45, 2023.

- [45] ISO 9001:2015, "Sistemas de gestión de la calidad – Requisitos", *International Organization for Standardization*, 2015.
- [46] IEEE 1680.1-2018, "Norma para la sostenibilidad de productos electrónicos", *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2018.
- [47] T. Tzanov, A. Petrova, and L. Vassileva, "Design and development of a PET recycling system for 3D filament production", *Journal of Sustainable Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 245-258, 2020.
- [48] J. Lares and J. Díaz, "Recycling PET plastic for 3D printing filaments: A case study," *Journal of Sustainable Engineering*, vol. 12, no. 5, pp. 67-72, 2017.
- [49] M. Stern, "Technological advances in plastic recycling," *Waste Management & Research Journal*, vol. 35, no. 1, pp. 88-94, 2016.
- [50] B. McKinnon, "Development of 3D printing filaments from recycled plastic waste," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 10, pp. 22-33, 2019.
- [51] Doria Alvarez, A., & Orozco Ospino, J. (2020). Evaluación de propiedades físico-químicas y mecánicas del adobe elaborado con cal para su uso en la construcción sostenible. *Revista Colombiana De Tecnologías de Avanzada*, 1(35), 89–94. <https://doi.org/10.24054/rcta.v1i35.47>
- [52] M. Rojas Puentes, C. Parada, y J. Leal Pabón, «Estructuras desglosadas de trabajo (EDT) en la gestión de alcance de proyectos de desarrollo de software», *RCTA*, vol. 1, n.º 39, pp. 51–58, ene. 2022, doi: 10.24054/rcta.v1i39.1375
- [53] Medina-Barahona, C. J., Mora, G. A., Calvache-Pabón, C., Salazar-Castro, J. A., Mora-Paz, H. A., & Mayorca-Torres, D. (2022). Propuesta de arquitectura IoT orientada a la creación de prototipos para su aplicación en plataformas educativas y de investigación. *Revista Colombiana de Tecnologías De Avanzada*, 1(39), 118–125. <https://doi.org/10.24054/rcta.v1i39.1405>
- [54] H. Hernández Palma, D. Novoa, y D. Mendoza Cásseres, «Energía renovables y medidas de eficiencia energética aplicables a las instituciones prestadoras de salud en Colombia», *RCTA*, vol. 1, n.º 41, pp. 123–131, may 2023, doi: 10.24054/rcta.v1i41.2557
- [55] C. Vergara Pareja, J. Niño Vega, y F. Fernández Morales, «Fortalecimiento de la lectura crítica en inglés a estudiantes de grado quinto a través de un recurso educativo digital», *RCTA*, vol. 2, n.º 40, pp. 160–170, sep. 2022, doi: 10.24054/rcta.v2i40.2370
- [56] J. Gómez, H. Yulady Jaramillo, y L. Coronel Rojas, «Sistema para detección de fallos críticos en tuberías horizontales», *Revista Colombiana de Tecnologías De Avanzada*, vol. 1, n.º 35, pp. 44–51, feb. 2020, doi: 10.24054/rcta.v1i35.41
- [57] D. B. Blanco, Y. P. González, O. M. D. Suárez, J. E. A. Vargas, J. L. D. Rodríguez and A. P. García, "GUI for fuzzy logic self-tuning PID control and FPD+I control in a temperature plant," *2023 IEEE Colombian Conference on Applications of Computational Intelligence (ColCACI)*, Bogotá D.C., Colombia, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ColCACI59285.2023.10225874
- [58] J. E. Araujo Vargas, D. Y. Franklin Coronel, and V. M. Arias Ruiz, "Nuevos modelos para la Caracterización, Detección y Diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas Rotativas", *Mundo Fesc*, vol. 13, no. S2, pp. 67–84, Jul. 2023, doi: 10.61799/2216-0388.1656.