

Diseño y fabricación de una férula de rehabilitación personalizada mediante tecnologías digitales y materiales compuestos

Design and fabrication of a custom rehabilitation splint using digital technologies and composite materials

Recibido: 27, enero de 2026

Aceptado: 03, febrero 2026

Publicado

online: 12, febrero 2026

Como Citar: A. Tipan-Martinez, E. Alulema-Ortiz, and A. Lopez-Llanos, "Diseño y fabricación de una férula de rehabilitación personalizada mediante tecnologías digitales y materiales compuestos", *Revista Digital Científica Causalidad (caui3)*, vol. 2, no. 1, pp. 53–61, Feb. 2026, doi: 10.70929/caui3.v2i1.0022.

Andy Tipán-Martínez¹, Estéfano Alulema-Ortiz¹, Alejandro López-Llanos¹

¹Carrera de Diseño Industrial, Pontificia Universidad Católica del Ecuador - Sede Ambato.

ISSN: 3073-1518

Creative Commons CC BY 4.0



Autor de correspondencia: astipanm@pucesa.edu.ec

Resumen:

El presente artículo científico expone de manera detallada el proceso de diseño y fabricación de una férula de rehabilitación personalizada, integrando tecnologías digitales de última generación aplicadas al campo del diseño industrial. Se emplearon herramientas de escaneo 3D, modelado CAD mediante software Blender, mecanizado CNC e impresión 3D en resina fotopolimérica, acompañadas de materiales compuestos como la resina poliéster y la fibra de vidrio. El objetivo principal fue desarrollar un producto ergonómico, accesible y sostenible que contribuya al proceso de rehabilitación física de pacientes con lesiones musculares o articulares. El artículo describe de forma pormenorizada cada fase técnica del proyecto, desde la digitalización anatómica hasta la integración electrónica basada en Arduino Nano y servomotores SG90. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de combinar procesos digitales y artesanales para obtener productos médicos personalizados de bajo costo, manteniendo altos estándares de calidad, precisión y confort para el usuario. Finalmente, se analiza el impacto del diseño industrial como herramienta interdisciplinaria en la innovación biomédica.

Palabras Clave: Férula personalizada, escaneo 3D, Blender, CNC, impresión 3D, rehabilitación, diseño industrial.

Abstract:

This scientific article provides a detailed account of the design and manufacturing process for a custom rehabilitation splint, incorporating state-of-the-art digital technologies applied to the field of industrial design. The project utilized 3D scanning tools, CAD modeling using Blender software, CNC machining, and 3D printing with photopolymer resin, along with composite materials such as polyester resin and fiberglass. The main objective was to develop an ergonomic, accessible, and sustainable product that contributes to the physical rehabilitation process of patients with muscle or joint injuries. The article describes in detail

each technical phase of the project, from anatomical digitization to electronic integration based on Arduino Nano and SG90 servomotors. The results demonstrate the feasibility of combining digital and artisanal processes to produce low-cost, customized medical products while maintaining high standards of quality, precision, and user comfort. Finally, the article analyzes the impact of industrial design as an interdisciplinary tool in biomedical innovation.

Keywords: Custom splint, 3D scanning, Blender, CNC, 3D printing, rehabilitation, industrial design.

1 Introducción

En los últimos años, la aplicación de tecnologías digitales al diseño industrial ha transformado significativamente la manera en que se concibe desarrolla y producen dispositivos orientados a la salud[1], [2], [3]. En particular, el campo de la rehabilitación física se ha beneficiado de la convergencia entre el modelado tridimensional, la ingeniería inversa y los procesos de manufactura asistida por ordenador (CAM). Estos avances han permitido crear férulas, órtesis y prótesis que responden de manera precisa a las características anatómicas y funcionales de cada paciente, logrando productos más cómodos, ligeros y efectivos[4], [5], [6].

A diferencia de los métodos tradicionales —como el yeso o los plásticos termoformables, la digitalización tridimensional y el modelado paramétrico ofrecen una reproducción fiel del cuerpo humano, reduciendo errores y tiempos de producción. Según Oud [7] y Waldburger [8], las férulas personalizadas fabricadas con tecnologías digitales proporcionan una mejor adaptación, una reducción significativa del peso y una mayor satisfacción del usuario durante la rehabilitación. Estas ventajas posicionan al diseño industrial como un aliado estratégico en la innovación biomédica.

Asimismo, la integración de sistemas mecatrónicos de bajo costo basados en microcontroladores de arquitectura abierta representa un avance significativo en la transición de dispositivos ortésicos estáticos hacia sistemas dinámicos y de rehabilitación activa o pasiva asistida [9], [10], [11]. La incorporación de actuadores y rutinas programadas de flexión y extensión no solo permite la ejecución de protocolos de Movilización Pasiva Continua (CPM), sino que también facilita el monitoreo de los rangos de movimiento (ROM) en tiempo real. Este enfoque mecatrónico accesible mitiga las barreras de costo asociadas a los equipos de fisioterapia comercial de alto nivel, permitiendo la implementación de esquemas terapéuticos cuantificables y adaptables a las fases de recuperación del paciente [10], [11].

Por otra parte, la combinación de manufactura aditiva y procesamiento de materiales compuestos en esquemas de fabricación híbrida optimiza el desempeño mecánico estructural de los dispositivos sin comprometer su ligereza ni su ergonomía [12], [13]. El uso de polímeros termoplásticos en conjunto con matriz de resina sintética y refuerzos de fibra permite distribuir eficazmente las cargas dinámicas generadas durante los ciclos de movimiento articular, mejorando la resistencia a la fatiga del material. Esta sinergia tecnológica demuestra que la integración de recursos de fabricación digital local y criterios de ecodiseño constituye una alternativa viable, económica y sostenible para la producción descentralizada de tecnología biomédica[13].

En este contexto, la presente investigación se centra en el desarrollo de una férula personalizada mediante procesos híbridos de fabricación —mecanizado CNC, impresión 3D y laminado con materiales compuestos—. Además, se integra un sistema electrónico de bajo costo controlado por Arduino Nano, capaz de simular movimientos repetitivos de flexión y extensión para complementar las terapias pasivas de rehabilitación

El propósito fundamental del estudio es demostrar la factibilidad técnica y económica de fabricar férulas ergonómicas personalizadas en entornos universitarios y

locales, aprovechando los recursos digitales disponibles y fomentando la sostenibilidad mediante el uso de materiales accesibles y reciclables.

Finalmente, se destaca la organización del manuscrito, siendo que en la sección 2 se describe de forma breve el marco teórico del trabajo, la sección 3 describe el desarrollo metodológico, la sección 4 describe los resultados, mientras, la sección 4 describe la discusión del trabajo, culminando con las conclusiones.

2 Marco teórico

La convergencia entre el diseño industrial y la biotecnología ha dado lugar a una nueva generación de dispositivos médicos personalizados, donde la precisión geométrica y la optimización estructural son factores clave. Según Sarmiento y Salazar [14], la ergonomía aplicada al diseño de órtesis exige la integración de criterios antropométricos, presión de contacto y confort térmico, lo que garantiza un equilibrio entre funcionalidad y bienestar del usuario.

Por otra parte, los estudios de García [15], donde se destacan que los materiales compuestos, como la resina poliéster reforzada con fibra de vidrio, ofrecen una excelente relación rigidez-peso, facilitando su aplicación en productos médicos que requieren resistencia estructural sin aumentar significativamente el peso. Este material además presenta ventajas en términos de disponibilidad, costo y facilidad de manipulación en talleres de diseño.

En cuanto a la digitalización anatómica, la tecnología de escaneo 3D ha revolucionado los procesos de personalización [16]. El escaneo de luz estructurada, empleado en este estudio, permite capturar la morfología corporal con una resolución milimétrica, ofreciendo una base de datos precisa para el modelado CAD posterior. Este método reduce considerablemente los errores humanos en comparación con las mediciones manuales o el moldeado con yeso.

El uso de software libre como Blender fortalece el aprendizaje y la accesibilidad tecnológica en contextos académicos. Blender ofrece herramientas potentes para limpiar, reparar y optimizar modelos 3D provenientes de escáneres, incluyendo la corrección de mallas, el suavizado de superficies y la aplicación de grosores uniformes. Estas capacidades lo convierten en una herramienta ideal para la preparación de modelos destinados al mecanizado CNC o la impresión 3D.

En la etapa de fabricación, la combinación de técnicas —CNC, impresión 3D y laminado manual— representa una estrategia híbrida efectiva [17]. Mientras el CNC proporciona precisión en la creación del molde, la impresión 3D permite elaborar piezas de ajuste detalladas y el laminado manual asegura robustez estructural. Este enfoque integral optimiza recursos y permite adaptar el proceso a las condiciones de talleres universitarios o de bajo presupuesto.

3 Metodología

El desarrollo de la férula personalizada se llevó a cabo bajo un enfoque experimental-aplicado, dividido en seis etapas principales. Cada fase se documentó cuidadosamente, considerando parámetros técnicos, materiales y procedimientos específicos.

3.1 Escaneado 3D

Se utilizó un escáner de luz estructurada Shining 3D para obtener una réplica tridimensional del antebrazo del usuario. El proceso de digitalización incluyó la toma de múltiples ángulos para asegurar la cobertura completa de la superficie, manteniendo una resolución de 0.1 mm. Los datos fueron procesados en el software del equipo para

eliminar ruido y cerrar mallas incompletas. El resultado fue un modelo preciso y anatómicamente fiel.

3.2 Modelado CAD

El modelo escaneado fue importado en Blender, donde se realizaron las operaciones de limpieza, alisado y corrección geométrica. Se definieron espesores uniformes de pared, se incorporaron ángulos de desmoldeo y se adaptaron zonas de ventilación. Este proceso garantizó una geometría ergonómica y lista para su fabricación digital (ver Figura 1).



Figura 1. Modelado CAD en Blender.

3.3 Mecanizado CNC

El modelo CAD optimizado se exportó en formato STL y se utilizó un software CAM para generar el código G correspondiente. Como se puede ver en la Figura 2, se mecanizó un molde en madera balsa utilizando una fresa HSS de 6 mm con dos canales helicoidales.



Figura 2. Proceso de mecanizado CNC.

3.4 Impresión 3D complementaria

Sobre el molde mecanizado, se aplicaron capas alternas de resina poliéster y fibra de vidrio tipo mat (ver Figura 3), garantizando una distribución homogénea y evitando burbujas de aire. Tras el curado, se procedió al desmoldeo, recorte de sobrantes y lijado de bordes.

Además, se fabricaron componentes secundarios mediante impresión 3D en resina fotopolimérica: cierres, uniones y puntos de sujeción. Así, estas piezas mejoraron el ajuste general del dispositivo y su ergonomía.

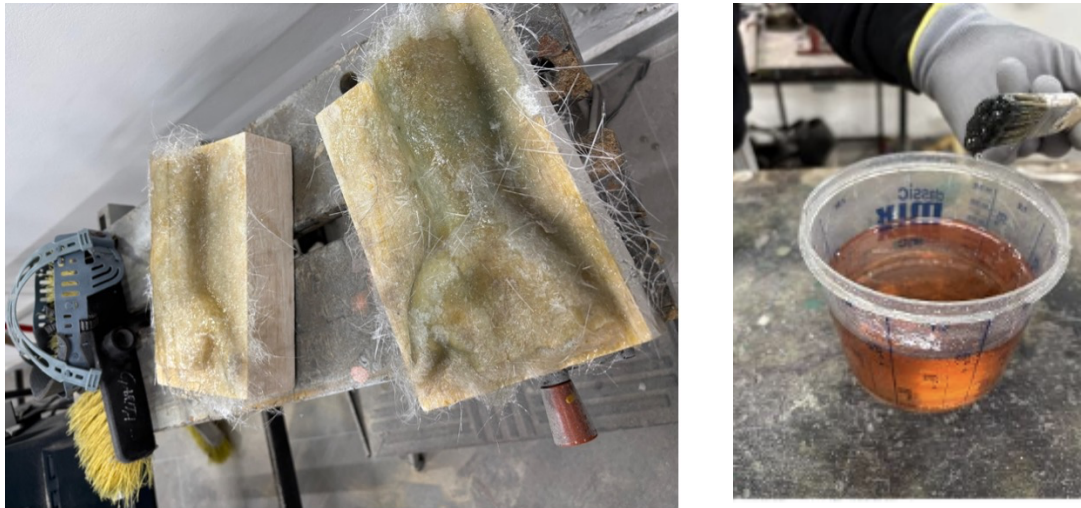


Figura 3. Aplicación de fibra de vidrio.

3.5 Integración electrónica

Con el objetivo de definir diferentes secuencias de rehabilitación de los tendones de los dedos de la mano, se implementó un sistema integrado con hardware Arduino Nano y servomotores SG90. Los motores fueron programados para realizar movimientos repetitivos de flexión y extensión, simulando ejercicios terapéuticos. El circuito eléctrico y la programación se realizaron en el entorno Arduino IDE, el diseño se puede ver en la Figura 4.

4 Resultados

El desarrollo de la férula personalizada permitió obtener un producto funcional, anatómicamente ajustado y tecnológicamente viable. Los resultados se analizaron en función de tres aspectos principales: la fidelidad geométrica, la calidad estructural y la funcionalidad electrónica del sistema integrado. Cada uno de estos parámetros se evaluó mediante observaciones técnicas, mediciones comparativas y pruebas experimentales en condiciones controladas.

El escaneo 3D del antebrazo proporcionó una reproducción anatómica precisa, con una desviación máxima de ± 0.8 mm respecto al modelo real. La fidelidad del proceso se validó mediante una comparación digital entre la malla escaneada y el modelo CAD corregido en Blender (ver la Figura 5). Las superficies obtenidas presentaron continuidad uniforme y ausencia de distorsiones significativas, confirmando la eficacia del escaneo de luz estructurada.

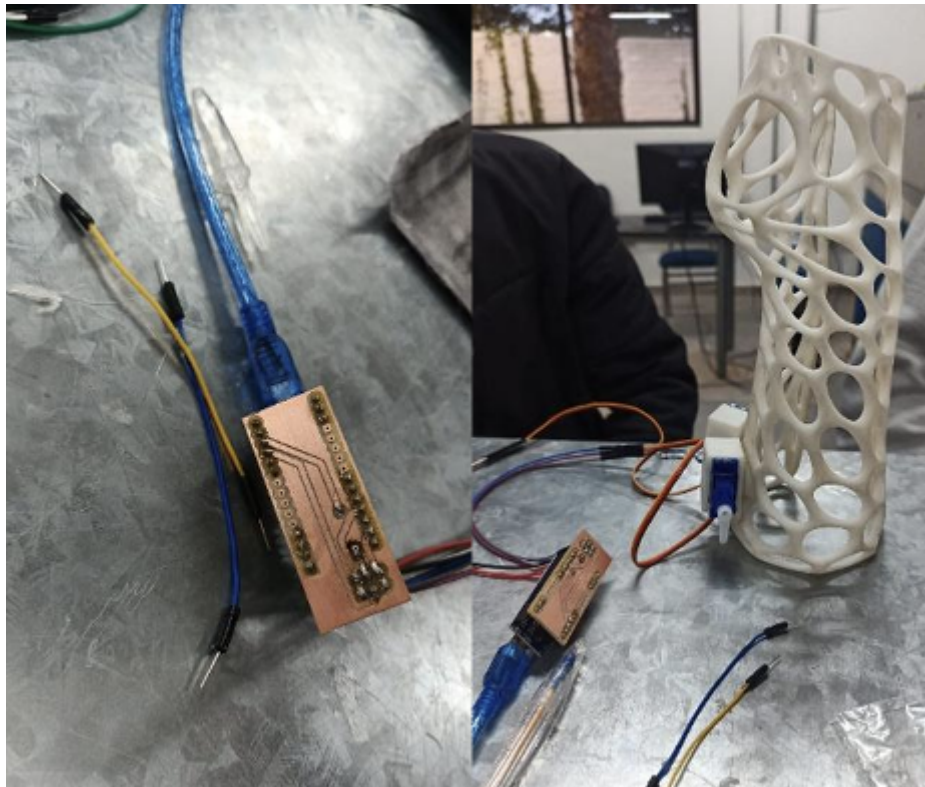


Figura 4. Sistema Arduino y servomotores.



Figura 5. Comparación del modelo escaneado y el modelo CAD.

4.1 Calidad estructural

La férula final fabricada con resina poliéster reforzada con fibra de vidrio mostró una excelente resistencia al esfuerzo y una adecuada flexibilidad para su uso terapéutico. Durante las pruebas de carga manual, el dispositivo soportó presiones equivalentes a

25N sin presentar deformaciones permanentes. El peso total fue de aproximadamente 150g, lo que representa una reducción del 40% respecto a férulas termoformadas convencionales.

La estructura laminar presentó uniformidad en el espesor y una adherencia óptima entre las capas de fibra. Sin embargo, se identificaron pequeñas irregularidades superficiales, atribuibles al proceso manual de laminado. Estas imperfecciones pueden corregirse en futuras versiones mediante la aplicación de una capa de gel coat final.

El sistema electrónico integrado con Arduino Nano y dos servomotores SG90 permitió reproducir movimientos alternos de flexión y extensión controlada. La programación incluyó un retardo variable de 500 ms entre cada ciclo de movimiento, simulando el ritmo de ejercicios terapéuticos de mano. Durante las pruebas de funcionamiento continuo (15 minutos por ciclo), no se registraron fallos eléctricos ni sobrecalentamiento en los motores. El circuito respondió de manera estable, validando la eficiencia del sistema mecatrónico incorporado.

5 Discusión

Los resultados obtenidos confirman que la integración de herramientas digitales dentro del proceso de diseño industrial permite obtener férulas personalizadas con altos niveles de precisión y funcionalidad. El uso de escaneo 3D y modelado CAD en Blender permitió desarrollar una geometría anatómica precisa y reproducible, superando las limitaciones del moldeado manual tradicional. Además, la implementación del mecanizado CNC garantizó una base sólida y estable para el laminado con resina y fibra.

La elección de materiales compuestos respondió a criterios de sostenibilidad, bajo costo y facilidad de manufactura. La madera balsa, empleada como molde, se comportó favorablemente en el mecanizado, mostrando buena respuesta al corte y mínima deformación. El empleo de resina poliéster y fibra de vidrio tipo mat aportó una alta rigidez estructural, combinada con flexibilidad suficiente para adaptarse a los movimientos del brazo del usuario.

Desde el punto de vista técnico, los parámetros de mecanizado y el proceso de laminado demostraron ser adecuados para la producción en entornos universitarios con equipamiento limitado. Sin embargo, se identificó la necesidad de optimizar la ventilación del modelo y los puntos de unión para mejorar el confort térmico y la circulación de aire en la zona cubierta.

En comparación con investigaciones similares, el presente proyecto incorpora un valor adicional al integrar un sistema electrónico de bajo costo. La férula no solo actúa como soporte pasivo, sino que también ofrece la posibilidad de ejecutar movimientos mecánicos programados, lo cual potencia la terapia activa del paciente.

Este avance tecnológico demuestra la capacidad del diseño industrial para abordar problemas biomédicos desde un enfoque interdisciplinario, combinando ingeniería, ergonomía y manufactura digital. Asimismo, el uso de software libre y materiales accesibles promueve la democratización tecnológica, permitiendo que estudiantes y diseñadores ecuatorianos desarrollen soluciones innovadoras a nivel local.

Conclusiones

La férula personalizada desarrollada mediante tecnologías digitales demostró alta precisión anatómica, resistencia estructural y funcionalidad mecatrónica efectiva.

El empleo de escaneo 3D y modelado CAD en Blender optimizó la etapa de diseño, reduciendo errores de medición y tiempos de ajuste.

Los materiales seleccionados (resina poliéster y fibra de vidrio) garantizaron un equilibrio entre ligereza, rigidez y durabilidad, adecuados para aplicaciones terapéuticas.

La integración de Arduino Nano y servomotores permitió añadir movimiento controlado, potenciando la rehabilitación activa del paciente.

El enfoque híbrido digital-artesanal constituye una alternativa viable y replicable para contextos académicos y talleres locales.

Se recomienda implementar sensores de presión y control por retroalimentación electromiográfica (EMG) en futuras versiones para automatizar la respuesta terapéutica.

Financiación

Los autores agradecen a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador – sede Ambato.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores no han declarado ningún posible conflicto de intereses en relación con esta investigación, la autoría y/o la publicación de este artículo.

Referencias

- [1] A. H. González and E. Olaizola, *Horizontes digitales, repensando la universidad en la era tecnológica*. Dirección General de Educación a Distancia y Tecnologías (EAD), 2025. doi: 10.35537/10915/177662.
- [2] D. F. Carvajal Flores and P. Abril Jiménez, “Promoviendo la Interoperabilidad Centrada en el Humano para la Transformación Digital: Estrategias de Integración de Datos Industriales con Estándares Web,” Universidad Politécnica de Madrid, 2024. doi: 10.20868/UPM.thesis.84419.
- [3] J. A. Torrecilla García, C. Pardo Ferreira, and J. C. Rubio Romero, “Industria 4.0 y transformación digital: nuevas formas de organización del trabajo,” *Revista de Trabajo y Seguridad Social*. CEF, pp. 27–54, May 2019, doi: 10.51302/rtss.2019.1430.
- [4] P. Patel and P. Gohil, “Custom orthotics development process based on additive manufacturing,” *Mater. Today Proc.*, vol. 59, pp. A52–A63, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.858.
- [5] M. N. Alotaibi *et al.*, “Comparing the Outcomes of Cast Immobilization with and Without K-Wire Fixation for Displaced Distal Radius Fractures in the Pediatric Population: A Systematic Review and Meta-Analysis,” *Medicina (B. Aires)*, vol. 61, no. 5, p. 852, May 2025, doi: 10.3390/medicina61050852.
- [6] J. M. Abzug, B. S. Schwartz, and A. J. Johnson, “Assessment of Splints Applied for Pediatric Fractures in an Emergency Department/Urgent Care Environment,” *Journal of Pediatric Orthopaedics*, vol. 39, no. 2, pp. 76–84, Feb. 2019, doi: 10.1097/BPO.0000000000000932.
- [7] T. A. M. Oud, E. Lazzari, H. J. H. Gijssbers, M. Gobbo, F. Nollet, and M. A. Brehm, “Effectiveness of 3D-printed orthoses for traumatic and chronic hand conditions: A scoping review,” *PLoS One*, vol. 16, no. 11, p. e0260271, Nov. 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0260271.
- [8] L. Kaspersetz *et al.*, “Automated Bioprocess Feedback Operation in a High-Throughput Facility via the Integration of a Mobile Robotic Lab Assistant,” *Frontiers in Chemical Engineering*, vol. 4, Apr. 2022, doi: 10.3389/fceng.2022.812140.
- [9] A. do N. Benitez *et al.*, “Spatial and simultaneous representative seroprevalence of anti-Toxoplasma gondii antibodies in owners and their domiciled dogs in a

- major city of southern Brazil," *PLoS One*, vol. 12, no. 7, p. e0180906, Jul. 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0180906.
- [10] K. Xu and S. Qin, "An Interdisciplinary Approach and Advanced Techniques for Enhanced 3D-Printed Upper Limb Prosthetic Socket Design: A Literature Review," *Actuators*, vol. 12, no. 6, p. 223, May 2023, doi: 10.3390/act12060223.
- [11] A. Manero *et al.*, "Evolving 3D-Printing Strategies for Structural and Cosmetic Components in Upper Limb Prosthesis," *Prosthesis*, vol. 5, no. 1, pp. 167–181, Feb. 2023, doi: 10.3390/prosthesis5010013.
- [12] C. P. Paul, K. Dileep, A. N. Jinoop, A. C. Paul, and K. S. Bindra, "Fused Filament Fabrication for External Medical Devices," 2021, pp. 299–322. doi: 10.1007/978-3-030-68024-4_16.
- [13] H. Hmaied, H. Sami, and B. Faouzi, "Design and Control of Two Degrees of Freedom Robot for a Passive Rehabilitation," *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 35, no. 6, pp. 1078–1096, Dec. 2024, doi: 10.1007/s40313-024-01131-8.
- [14] J. Sarmiento Anchundia and R. Salazar Loor, "Selección de materiales para el diseño de ortesis aplicando Métodos Multicriterios, Simulación y Optimización Topológica," *Revista InGenio*, vol. 5, no. 2, pp. 16–30, Jul. 2022, doi: 10.18779/ingenio.v5i2.518.
- [15] J. García, B. D. Analuiza Hidalgo, W. G. Agualongo Amangandi, and M. X. Remache Sasig, "Caracterización mecánica de un material compuesto de resina poliéster reforzado con corteza de eucalipto," *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, vol. 16, no. 2, Sep. 2024, doi: 10.18272/aci.v16i2.3353.
- [16] M. Martín Izquierdo, "Segmentación manual y automática de imágenes radiológicas seccionales para resecciones pulmonares anatómicas con cirugía robótica," Universidad de Salamanca, 2024. doi: 10.14201/gredos.159613.
- [17] J. Bernal-Plaza, C. De-Jesús-Méndez, H. Vidal-Pérez, and A. Troncoso-Palacio, "Transformando la Manufactura Global. Ventajas y Retos de la Impresión 3D Frente a Métodos Tradicionales," *Boletín de Innovación, Logística y Operaciones*, vol. 7, no. 2, pp. 23–35, Jul. 2025, doi: 10.17981/bilo.7.2.2025.03.