



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

**EXTENSIÓN LA MANÁ**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRADO DE DIGITALIZACIÓN E  
IMPRESIÓN 3D PARA PROCESOS DE INGENIERÍA INVERSA Y  
FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS, PARA EL LABORATORIO DE  
ELECTROMECÁNICA DE LA UTC EXTENSIÓN LA MANÁ”**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniería  
Electromecánico CIYA

**AUTORES:**

Saquina Galora Steve Vicente

Rivera Sánchez Anthony Israel

**TUTOR:**

Ing. Hidalgo Osorio William Armando

**LA MANÁ-ECUADOR  
ENERO-2026**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros Steve Vicente Saquinga Galora y Anthony Israel Rivera Sánchez, declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRADO DE DIGITALIZACIÓN E IMPRESIÓN 3D PARA PROCESOS DE INGENIERÍA INVERSA Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS, PARA EL LABORATORIO DE ELECTROMECAÁNICA DE LA UTC EXTENSIÓN LA MANÁ”**, siendo el Ing. Hidalgo Osorio William Armando MSc., tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Saquinga Galora Steve Vicente

C.I: 1805638044

Rivera Sanchez Anthony Israel

C.I: 0550421143

## **AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRADO DE DIGITALIZACIÓN E IMPRESIÓN 3D PARA PROCESOS DE INGENIERÍA INVERSA Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS, PARA EL LABORATORIO DE ELECTROMECAÁNICA DE LA UTC EXTENSIÓN LA MANÁ”**, Saquina Galora Steve Vicente y Rivera Sanchez Anthony Israel, de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la Facultad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas - CIYA de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

La Maná, 17 marzo 2026



Ing. Hidalgo Osorio William Armando MSc

0502657885

**TUTOR**

## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN**

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente informe de investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi extensión La Maná, y por Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas – CIYA por cuanto los postulantes Saquinga Galora Steve Vicente y Rivera Sanchez Anthony Israel, con el título de Proyecto de Investigación: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRADO DE DIGITALIZACIÓN E IMPRESIÓN 3D PARA PROCESOS DE INGENIERÍA INVERSA Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS, PARA EL LABORATORIO DE ELECTROMECAÁNICA DE LA UTC EXTENSIÓN LA MANÁ”**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

La Maná, marzo 17 2026



Ing. Romero Bedón Freddy Rodrigo

C.I: 0503499642

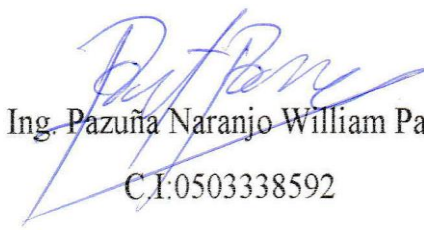
**LECTOR 1 (PRESIDENTE)**



Ing. Paredes Anchatipán Alex Darwin

C.I: 0503614935

**LECTOR 2 (MIEMBRO)**



Ing. Pazuña Naranjo William Paúl

C.I:0503338592

**LECTOR 3 (MIEMBRO)**

## **AGRADECIMIENTO**

*Queremos expresar nuestra gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre nuestras vidas y a toda nuestra familia por estar siempre presentes, a nuestras madres, padres y hermanos.*

*Nuestro profundo agradecimiento a todas las autoridades y personal que hacen la Universidad Técnica de Cotopaxi extensión La Maná, por confiar en nosotros, abrirnos las puertas y permitirnos realizar todo el proceso investigativo dentro de su establecimiento educativo.*

*De igual manera agradecemos a nuestros docentes en especial a nuestro docente MSc. William Hidalgo, principal colaborador durante todo este proceso, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo.*

**Steve**

**Anthony**

## **DEDICATORIA**

*Esta tesis está dedicada a Dios quien ha sido mi guía, fortaleza y fidelidad. A mis abuelitos maternos, a mi mamá, a David Rojano y familia, Nelly Galora y familia, por el apoyo incondicional que llegue a tener de ellos a lo largo de la carrera que con su apoyo moral he podido llegar a este momento de mi vida*

*Por último, a Selena Zuñiga por estar incondicionalmente a mi lado desde que inicie*

**Steve**

*Este proyecto de grado es dedicado principalmente a mi madre Malene Del Rocio Sanchez Pilatasig gracias por los valores inculcados que me han enseñado a estar dispuesto a retos en la vida, a tener un gran corazón y ser perseverante.*

*A mis hermanos: Alex Fabricio Germán Sanchez, Deivid Fabián Rivera Sanchez y Maryuri Mayte Rivera Sanchez por ser mi apoyo para conseguir este sueño.*

*A mis abuelos Segundo Manuel Iza Sanchez y María Olga Pilatasig Moreno por ser una inspiración para continuar día a día.*

**Anthony**

# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

## **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**

**TÍTULO:** “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRADO DE DIGITALIZACIÓN E IMPRESIÓN 3D PARA PROCESOS DE INGENIERÍA INVERSA Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS, PARA EL LABORATORIO DE ELECTROMECAÁNICA DE LA UTC EXTENSIÓN LA MANÁ”

### **Autores:**

Saquina Galora Steve Vicente

Rivera Sánchez Anthony Israel

### **RESUMEN**

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo la implementación de un sistema integrado de digitalización tridimensional e impresión 3D para el desarrollo de procesos de ingeniería inversa y fabricación de prototipos en el laboratorio de Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná. La metodología empleada se fundamentó en un enfoque aplicado y experimental, estructurado bajo el ciclo operativo scan-to-CAD-to-print, que articula las etapas de captura geométrica mediante escaneo 3D, reconstrucción paramétrica en software CAD y materialización física mediante manufactura aditiva. El sistema en el que se fundamenta el trabajo combina un escáner 3D Seal Lite de 3DMakerPro, de precisión 0,02 mm y resolución 0,07 mm, basado en una tecnología de luz estructurada LED azul; y una impresora de tecnología FDM con volumen de impresión 300 x 300 x 400 mm. Ambos elementos han sido instalados y preparados para montar el sistema en una estación de trabajo móvil, diseñada exprofeso para su utilización en el laboratorio, que presenta mesa giratoria, iluminación de orientación y sistema de almacenamiento de materiales. Los resultados obtenidos demuestran la funcionalidad del sistema mediante la digitalización y la posterior impresión, validando la correspondencia dimensional entre el modelo digital y el prototipo fabricado en cuanto a sus dimensiones, que presentan la desviación necesaria para que sea aceptable en el ámbito académico y experimental. De este modo, se puede afirmar que la implementación del sistema refuerza las

capacidades del laboratorio para el desarrollo de prácticas de ingeniería inversa, el prototipado funcional y la experimentación aplicada a niveles más altos, contribuyendo al desarrollo de las competencias profesionales necesarias para hacer frente a las exigencias de las tecnologías actuales de las industrias.

**Palabras clave:** Digitalización 3D, manufactura aditiva, ingeniería inversa, prototipado, escáner 3D, impresión 3D.

## ABSTRACT

The present research project aimed to implement an integrated three-dimensional digitalization and 3D printing system for the development of reverse engineering processes and prototype manufacturing in the Electromechanical laboratory of the Technical University of Cotopaxi, La Maná Extension. The methodology employed was based on an applied and experimental approach, structured under the scan-to-CAD-to-print operational cycle, which articulates the stages of geometric capture through 3D scanning, parametric reconstruction in CAD software, and physical materialization through additive manufacturing. The system on which this work is based combines a 3DMakerPro Seal Lite 3D scanner, with 0.02 mm precision and 0.07 mm resolution, based on blue LED structured light technology; and an FDM printer with a 300 x 300 x 400 mm build volume. Both components have been installed and prepared for mounting on a mobile workstation, specifically designed for laboratory use, which features a rotating table, orientation lighting, and a material storage system. The results obtained demonstrate the system's functionality through digitization and subsequent printing, validating the dimensional correspondence between the digital model and the manufactured prototype in terms of their dimensions, which exhibit the necessary deviation to be acceptable in academic and experimental settings. Thus, it can be stated that the implementation of the system strengthens the laboratory's capabilities for the development of reverse engineering practices, functional prototyping and applied experimentation at higher levels, contributing to the development of the professional skills necessary to meet the demands of current technologies in industries.

**Keywords:** 3D digitalization, additive manufacturing, reverse engineering, prototyping, 3D scanner, 3D printing.

## ÍNDICE

|                                                                                     |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------|
| DECLARACIÓN DE AUDITORÍA .....                                                      | ii   |
| AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN .....                                   | iii  |
| APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN .....                                         | iv   |
| <i>AGRADECIMIENTO</i> .....                                                         | v    |
| <i>DEDICATORIA</i> .....                                                            | vi   |
| RESUMEN .....                                                                       | vii  |
| ABSTRACT .....                                                                      | ix   |
| ÍNDICE .....                                                                        | x    |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                                                              | xiv  |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                                             | xv   |
| ANEXOS .....                                                                        | xvii |
| 1. INFORMACIÓN GENERAL .....                                                        | 1    |
| 2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....                                                 | 2    |
| 3. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO .....                                                 | 3    |
| 3.1. Beneficiarios Directos .....                                                   | 3    |
| 3.2. Beneficiarios Indirectos .....                                                 | 4    |
| 4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....                                                  | 4    |
| 5. OBJETIVOS .....                                                                  | 6    |
| 5.1. Objetivo General .....                                                         | 6    |
| 5.2. Objetivos Específicos .....                                                    | 6    |
| 6. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS<br>PLANTEADOS: ..... | 7    |
| 7. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA .....                                          | 9    |

|        |                                                                                                                |    |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.1.   | Tecnología de Escaneo Tridimensional.....                                                                      | 9  |
| 7.1.1. | Sistemas de contacto (CMM) .....                                                                               | 9  |
| 7.1.2. | Sistemas sin contacto (ópticos).....                                                                           | 9  |
| 7.1.3. | Proceso de generación de la nube de puntos y malla 3D.....                                                     | 10 |
| 7.2.   | Ingeniería Inversa y Digitalización Tridimensional .....                                                       | 10 |
| 7.2.1. | Conceptualización de la ingeniería inversa en sistemas electromecánicos .....                                  | 12 |
| 7.2.2. | Tecnologías de escaneo tridimensional .....                                                                    | 13 |
| 7.2.3. | Procesamiento de nubes de puntos y generación de mallas .....                                                  | 15 |
| 7.2.4. | Reconstrucción geométrica paramétrica en CAD .....                                                             | 15 |
| 7.3.   | Manufactura Aditiva e Impresión 3D.....                                                                        | 16 |
| 7.3.1. | Tecnologías de impresión 3D aplicadas a prototipado electromecánico.....                                       | 17 |
| 7.3.2. | Impresoras 3D: Tecnología y Principios de Manufactura Aditiva .....                                            | 17 |
| 7.3.3. | Proceso de impresión FDM: flujo desde el archivo digital hasta la pieza.....                                   | 19 |
| 7.3.4. | Materiales utilizados en impresión 3D .....                                                                    | 19 |
| 7.3.5. | Post-procesamiento y acondicionamiento de prototipos .....                                                     | 20 |
| 7.4.   | Integración de Sistemas de Digitalización 3D y Manufactura Aditiva en Entornos de Formación en Ingeniería..... | 21 |
| 7.5.   | Impacto Tecnológico en la Formación de Ingeniería .....                                                        | 23 |
| 7.6.   | Control de Calidad, Metrología y Validación Dimensional de Prototipos.....                                     | 25 |
| 7.6.2. | Principios de evaluación dimensional en prototipos fabricados mediante manufactura aditiva .....               | 26 |
| 7.6.3. | Ensayos funcionales y validación estructural en prototipos de aplicación ingenieril                            | 27 |
| 7.6.4. | Criterios de aceptación técnica de prototipos fabricados mediante manufactura aditiva                          | 28 |

|         |                                                                              |    |
|---------|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.7.    | Seguridad Operativa, Gestión de Riesgos y Condiciones de Laboratorio.....    | 29 |
| 7.7.1.  | Seguridad en el uso de escáneres 3D e impresoras de manufactura aditiva..... | 30 |
| 7.7.2.  | Manejo seguro de materiales, filamentos y resinas técnicas .....             | 31 |
| 7.7.3.  | Condiciones ambientales y estabilidad operativa del laboratorio .....        | 31 |
| 7.7.4.  | Protocolos de mantenimiento preventivo y continuidad operativa .....         | 32 |
| 8.      | PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPOTESIS: .....                                     | 33 |
| 9.      | METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL .....                                      | 33 |
| 9.1.    | Enfoque metodológico del proyecto.....                                       | 33 |
| 9.2.    | Escenario de implementación del proyecto .....                               | 34 |
| 9.3.    | Criterios de Selección de Equipos Tecnológicos .....                         | 35 |
| 9.3.1.  | Requerimientos técnicos del sistema.....                                     | 35 |
| 9.4.    | Justificación de la selección del Escáner 3D Seal Lite de 3DMakerPro .....   | 36 |
| 9.4.1.  | Justificación de la selección de la Impresora 3D Ender con cama Mingda ..... | 36 |
| 9.4.2.  | Análisis de incertidumbre del proceso scan-to-CAD-to-print .....             | 37 |
| 10.     | ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....                                 | 37 |
| 10.1.   | Proceso de digitalización tridimensional.....                                | 38 |
| 10.2.   | Proceso de fabricación mediante impresión 3D .....                           | 38 |
| 10.3.   | Prototipos fabricados y resultados obtenidos .....                           | 39 |
| 10.3.1. | Prototipo 1: Tapacubos de vehículo .....                                     | 39 |
| 10.3.2. | Prototipo 2: Rotor dentado .....                                             | 39 |
| 10.3.3. | Prototipo 3: Engranaje de transmisión.....                                   | 40 |
| 10.3.4. | Prototipo 4: Componente cilíndrico concéntrico.....                          | 40 |
| 10.3.5. | Prototipo 5: Contenedor cilíndrico con tapa.....                             | 41 |
| 10.4.   | Análisis dimensional comparativo.....                                        | 41 |

|       |                                                               |                                      |
|-------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 10.5. | Validación del flujo de trabajo scan-to-CAD-to-print.....     | 42                                   |
| 11.   | IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONÓMICOS) ..... | 45                                   |
| 11.1. | Impacto técnico.....                                          | 45                                   |
| 11.2. | Impacto social.....                                           | 45                                   |
| 11.3. | Impacto ambiental .....                                       | 46                                   |
| 11.4. | Impacto económico.....                                        | 46                                   |
| 12.   | PRESUPUESTO PARA LA PROPUESTA DEL PROYECTO:.....              | 47                                   |
| 13.   | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                          | 47                                   |
| 13.1. | Conclusiones.....                                             | 47                                   |
| 13.2. | Recomendaciones .....                                         | 49                                   |
| 14.   | BIBLIOGRAFÍA .....                                            | 49                                   |
| 15.   | ANEXOS.....                                                   | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
|       | Manual de uso Escáner 3D Seal Lite.....                       | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
|       | Apéndice A .....                                              | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
|       | Manual de uso Impresora 3D ENDER V3 .....                     | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
|       | Apéndice B .....                                              | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
|       | PROCESO DE ELABORACIÓN DEL SISTEMA .....                      | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Actividades, resultados esperados y técnicas en relación con los objetivos .....                                                | 7  |
| Tabla 2. Comparativa de tecnologías de escaneo tridimensional sin contacto. [5] .....                                                    | 9  |
| Tabla 3. Comparación técnica de tecnologías de digitalización tridimensional aplicadas a ingeniería inversa.....                         | 13 |
| Tabla 4. Principales tecnologías de impresión 3D aplicadas al prototipado académico e industrial. ....                                   | 18 |
| Tabla 5. Contribución de la digitalización 3D y la manufactura aditiva al desarrollo de competencias en formación de ingeniería .....    | 24 |
| Tabla 6. Parámetros de evaluación dimensional aplicados al control de calidad de prototipos fabricados mediante impresión 3D. [23] ..... | 27 |
| Tabla 7. Criterios técnicos de aceptación y evaluación de conformidad de prototipos fabricados. [24] .....                               | 28 |
| Tabla 8. Medidas operativas de seguridad para el manejo de materiales utilizados en manufactura aditiva. [28].....                       | 31 |
| Tabla 9. Plan técnico de mantenimiento preventivo y seguimiento operativo del sistema. [29] ..                                           | 32 |
| Tabla 10. Requerimientos técnicos establecidos para la selección de equipos del sistema integrado .....                                  | 35 |
| Tabla 11. Comparativa de alternativas de escáneres 3D evaluadas .....                                                                    | 36 |
| Tabla 10. Análisis dimensional comparativo de los prototipos fabricados .....                                                            | 42 |
| Tabla 11. Tiempos de ejecución del proceso scan-to-CAD-to-print .....                                                                    | 43 |
| Tabla 12. Presupuesto.....                                                                                                               | 47 |
| Tabla 13. Programa de mantenimiento preventivo del Escáner 3D Seal Lite; <b>Error! Marcador no definido.</b>                             |    |
| Tabla 14. Características diferenciadoras del PLA Pro y el PLA Plus; <b>Error! Marcador no definido.</b>                                 |    |

Tabla 15. Parámetros térmicos recomendados para la Ender-3 V3;**Error! Marcador no definido.**

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Esquema general del flujo de trabajo de ingeniería inversa scan-to-CAD-to-print. ...                                                   | 11 |
| Figura 2. Proceso de reconstrucción de malla a partir de nube de puntos digitalizada. [8] .....                                                  | 15 |
| Figura 3. Modelo CAD paramétrico obtenido a partir de la reconstrucción de una pieza digitalizada. [7] .....                                     | 16 |
| Figura 4. Esquema general del proceso de manufactura aditiva aplicado al prototipado electromecánico. [10] .....                                 | 17 |
| Figura 5. Comparación morfológica y estructural de piezas impresas con diferentes materiales poliméricos [10].....                               | 20 |
| Figura 6. Proceso de post-procesamiento y acondicionamiento de un prototipo fabricado mediante impresión 3D. [12].....                           | 20 |
| Figura 7. Esquema conceptual de integración entre digitalización 3D, modelado CAD y manufactura aditiva en entornos académicos. [13] .....       | 22 |
| Figura 8. Representación conceptual del ciclo formativo basado en ingeniería inversa y prototipado mediante manufactura aditiva. [15].....       | 22 |
| Figura 10. Esquema conceptual de validación dimensional entre modelo CAD, malla escaneada y prototipo físico.[22] .....                          | 26 |
| Figura 11. Representación conceptual del proceso de validación funcional de un prototipo aplicado a un sistema mecánico de prueba. [24].....     | 28 |
| Figura 12. Esquema conceptual de zonas de riesgo y áreas de seguridad en laboratorios con sistemas de escaneo 3D e impresión aditiva. [26] ..... | 30 |
| Figura 13. Medidas de seguridad operativa aplicadas a sistemas de impresión 3D. [28] .....                                                       | 30 |
| Figura 14. Prototipo de tapacubos fabricado mediante impresión 3D FDM.....                                                                       | 39 |
| Figura 15. Prototipo de rotor dentado recién fabricado sobre la cama de impresión Mingda .....                                                   | 40 |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 16. Prototipo de engranaje de transmisión fabricado en PLA.....                    | 40 |
| Figura 17. Prototipo de componente cilíndrico concéntrico.....                            | 41 |
| Figura 18. Prototipo de contenedor cilíndrico con tapa ensamblada.....                    | 41 |
| Figura 19. Comparativa de tiempos de ejecución por etapa del proceso scan-to-CAD-to-print | 44 |

## ANEXOS

Hojas de vida ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Proceso de Elaboración del Sistema..... **¡Error! Marcador no definido.**

## **1. INFORMACIÓN GENERAL**

**Título del Proyecto:** “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRADO DE DIGITALIZACIÓN E IMPRESIÓN 3D PARA PROCESOS DE INGENIERÍA INVERSA Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS, PARA EL LABORATORIO DE ELECTROMECÁNICA DE LA UTC EXTENSIÓN LA MANÁ”

**Fecha de inicio:** septiembre del 2025

**Fecha de finalización:** enero 2026

**Lugar de ejecución:** Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná

**Unidad Académica que auspicia:** Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas CIYA

**Carrera que auspicia:** Ingeniería Electromecánica

**Equipo de Trabajo:**

Steve Vicente Saquina Galora

Anthony Israel Rivera Sánchez

Ing. William Armando Hidalgo Osorio

**Área de Conocimiento:** Ingeniería, Industria y Construcción

**Línea de investigación:** Procesos Industriales

**Sub líneas de investigación de la Carrera:** Diseño, construcción y mantenimiento de elementos, prototipos y sistemas electromecánicos.

## **2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

La incorporación de tecnologías de digitalización tridimensional, ingeniería inversa y manufactura aditiva en los laboratorios universitarios constituye actualmente un componente clave en la modernización de los procesos de formación en ingeniería, debido a su relación directa con los principios de la Industria 4.0, el diseño digital y la fabricación inteligente. En el contexto académico de la carrera de Ingeniería Electromecánica, estas tecnologías permiten cerrar la brecha existente entre los procesos teóricos de modelado y los procesos prácticos de construcción y validación de prototipos funcionales, fortaleciendo así la formación profesional aplicada y orientada a la solución de problemas reales del entorno productivo [1], [2]

En la actualidad, gran parte de los laboratorios universitarios continúan trabajando bajo metodologías tradicionales de prototipado manual, lo que limita la capacidad de los estudiantes para desarrollar competencias en reconstrucción geométrica, rediseño de componentes, evaluación dimensional, fabricación rápida y validación mecánica, competencias que son demandadas en sectores industriales como mantenimiento, manufactura, automatización y diseño mecánico. La implementación de un sistema integrado de escaneo 3D, reconstrucción CAD paramétrica e impresión 3D permite establecer un flujo de trabajo tipo scan-to-CAD-to-print, considerado en la literatura científica como un recurso esencial para el desarrollo de proyectos de ingeniería inversa, recuperación de piezas obsoletas, rediseño funcional y producción de prototipos de bajo costo con fines educativos y experimentales [2], [3]

Desde la perspectiva institucional, el proyecto se justifica porque fortalece el rol del laboratorio de Electromecánica como espacio de aprendizaje activo, promoviendo experiencias basadas en proyectos, experimentación aplicada y resolución de problemas reales, elementos fundamentales para la formación de ingenieros competentes y con capacidad de innovación. Diversos estudios evidencian que la integración de herramientas digitales como el escaneo 3D, el CAD avanzado y la manufactura aditiva contribuye significativamente al desarrollo de habilidades técnicas, pensamiento crítico y creatividad, incrementando la pertinencia de los procesos de enseñanza-aprendizaje en educación superior [1], [4]

También, el proyecto responde a una necesidad regional asociada a la disponibilidad limitada de repuestos especializados y componentes mecánicos, especialmente en entornos productivos donde existen equipos con piezas discontinuadas o de difícil importación. La capacidad de digitalizar,

modelar y fabricar componentes bajo demanda no solo fortalece los procesos académicos, sino que abre la posibilidad de desarrollar servicios de apoyo técnico y transferencia de conocimiento hacia la comunidad y sectores productivos locales, contribuyendo al cambio de la matriz productiva y al fortalecimiento de capacidades tecnológicas territoriales [2], [3]

Además, la propuesta se justifica porque contribuye al cumplimiento de los objetivos formativos de la carrera de Ingeniería Electromecánica, al integrar tecnología de última generación en procesos académicos, promover la cultura de innovación y potenciar la investigación aplicada mediante prototipado funcional, análisis dimensional y fabricación experimental. De esta manera, el proyecto no solo representa una mejora tecnológica del laboratorio, sino una intervención académica estratégica, coherente con las tendencias internacionales de educación en ingeniería y con las necesidades científicas y tecnológicas del entorno universitario e industrial [1]–[4]

### **3. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO**

#### **3.1. Beneficiarios Directos**

Los principales beneficiarios del proyecto son los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná, quienes accederán a un entorno de aprendizaje fortalecido mediante la incorporación de tecnologías de digitalización tridimensional, ingeniería inversa y manufactura aditiva aplicadas al desarrollo de prototipos. La puesta en marcha del sistema integrado favorece que los estudiantes se involucren en procesos formativos sustentados en la experimentación práctica, el análisis dimensional, el rediseño de elementos y la validación funcional de elementos, lo que colabora en la formación de competencias profesionales vinculadas al diseño, el mantenimiento y la fabricación de sistemas electromecánicos.

Por la misma, los docentes del laboratorio de Electromecánica se convierten en beneficiarios por cuanto con la oferta del sistema integrado contarán con herramientas tecnológicas que enriquecen la planificación y ejecución de las prácticas académicas, de los proyectos de investigación aplicada y de actividades de vinculación con el medio de producción. La disponibilidad del sistema integrado facilitará el diseño de experiencias pedagógicas orientadas a la innovación tecnológica, promoviendo el uso de metodologías activas y el fortalecimiento de procesos académicos con enfoque interdisciplinario.

El laboratorio de Electromecánica se ve igualmente beneficiado de forma directa, porque se consolida como un laboratorio académico-tecnológico especializado en procesos de ingeniería inversa, prototipos funcionales y fabricación experimental, incrementando su capacidad, y equipamiento técnico y su importancia institucional dentro de la formación de los profesionales de la materia.

### **3.2. Beneficiarios Indirectos**

Los beneficiarios indirectos de este proyecto son la comunidad universitaria en general (estudiantes y profesores de otras carreras afines) que van a poder acceder al uso complementario del laboratorio para realizar actividades académicas y proyectos interdisciplinarios relacionados con el diseño, la manufactura, la innovación tecnológica y los prototipos.

De la misma manera, los sectores productivos y técnicos del cantón La Maná y su zona de influencia se constituyen en beneficiarios indirectos, en la medida en que la implementación del sistema integrado de digitalización e impresión 3D contribuye a la formación de talento humano con competencias aplicadas a la solución de problemas reales asociados al mantenimiento industrial, la fabricación de componentes, la recuperación de piezas y la optimización de procesos. De manera complementaria, el proyecto genera oportunidades para el desarrollo de iniciativas de vinculación y transferencia de conocimiento hacia talleres, microempresas, unidades productivas y actores del sector industrial que eventualmente puedan requerir apoyo técnico o colaboración académica.

También, la institución universitaria se beneficia a nivel institucional, al fortalecer su infraestructura tecnológica y su capacidad de investigación aplicada, consolidando su compromiso con la innovación, la pertinencia académica y la contribución al desarrollo regional a través de la formación de profesionales altamente competentes en el ámbito electromecánico.

## **4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

En el laboratorio de Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná, las prácticas de formación de proyectos se llevan a cabo, principalmente, con procesos convencionales de elaboración manual y modelado básico, lo que supone un impedimento para incluir herramientas tecnológicas que apunten hacia la ingeniería inversa, la reconstrucción

geométrica digital o la fabricación rápida de componentes, lo que produce un freno para alcanzar el objetivo fuera del aula, dado los escasos recursos y el entorno no articulado que disponible para los estudiantes y que relaciona de un modo integrado la digitalización tridimensional, el modelado paramétrico y la manufactura aditiva para el desarrollo de los proyectos.

La carencia de un sistema tecnológico que permita implementar un flujo de trabajo para tipo scan-to-CAD-to-print supone que la reproducción y análisis de piezas mecánicas, muy básico, la validación dimensional de los componentes, el rediseño funcional de los elementos electromecánicos y la fabricación de prototipos que den respuesta a necesidades académicas, investigativas y de vinculación con el entorno tenga dificultades. Esta situación deriva en la limitación de los procesos formativos vinculados al desarrollo de competencias de diseño digital, fabricación avanzada y análisis técnico de componentes disminuyendo de este modo la aplicación práctica de los conocimientos teóricos adquiridos en el aula.

A nivel académico y formativo, la carencia mencionada repercute de manera significativa sobre la adquisición de competencias profesionales relacionadas con la ingeniería inversa, con el uso de escáneres 3D, la reconstrucción CAD paramétrica o la impresión 3D, entre otros, como herramientas para el mantenimiento, la fabricación o el desarrollo de soluciones tecnológicas en el ámbito electromecánico. Por otro lado, el laboratorio no tiene una infraestructura articulada y capaz de generar proyectos experimentales del ámbito del prototipado funcional, la investigación aplicada y la innovación tecnológica, aspectos que son necesarios en la formación de ingenieros que sean competitivos y respondan a lo que demandan el entorno productivo.

En este contexto, surge la necesidad de responder a la siguiente problemática central: ¿De qué manera la implementación de un sistema integrado de digitalización tridimensional e impresión 3D para procesos de ingeniería inversa y fabricación de prototipos puede fortalecer las actividades académicas, experimentales y de formación práctica desarrolladas en el laboratorio de Electromecánica de la UTC Extensión La Maná?

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. Objetivo General**

Implementar un sistema integrado de digitalización tridimensional e impresión 3D para el desarrollo de procesos de ingeniería inversa y fabricación de prototipos en el laboratorio de Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná.

### **5.2. Objetivos Específicos**

- Diseñar el flujo de trabajo técnico del sistema integrado scan-to-CAD-to-print mediante un diagrama de proceso estructurado, que articule las etapas de digitalización tridimensional, reconstrucción geométrica paramétrica y manufactura aditiva, estableciendo el procedimiento operativo para la elaboración de prototipos funcionales en el laboratorio de Electromecánica.
- Seleccionar los equipos, software y recursos tecnológicos necesarios para la implementación del sistema de digitalización e impresión 3D, justificando la elección mediante criterios técnicos que garanticen su operatividad y aplicación en actividades académicas e ingeniería inversa.
- Desarrollar prototipos experimentales a partir de piezas electromecánicas digitalizadas, evaluando el funcionamiento del sistema implementado mediante el análisis dimensional comparativo entre las piezas originales, los modelos escaneados y los prototipos impresos, y cuantificando las desviaciones obtenidas respecto a tolerancias aceptables en el ámbito académico.

## 6. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS:

**Tabla 1.** Actividades, resultados esperados y técnicas en relación con los objetivos

| Objetivos Específicos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Actividades                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Resultados Esperados                                                                                                                                                                                                                                                                            | Descripción (Técnicas e Instrumentos)                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Diseñar el flujo de trabajo técnico del sistema integrado scan-to-CAD-to-print mediante un diagrama de proceso estructurado, que articule las etapas de digitalización tridimensional, reconstrucción geométrica paramétrica y manufactura aditiva, estableciendo el procedimiento operativo para la elaboración de prototipos funcionales en el laboratorio de Electromecánica.</li> </ul> | <p>Análisis del proceso de ingeniería inversa aplicado a piezas electromecánicas.</p> <p>Definición de etapas del flujo de trabajo desde la captura digital hasta la fabricación del prototipo. Elaboración de diagramas de proceso y documentación técnica del procedimiento operativo.</p> | <p>Flujo de trabajo estructurado para el proceso <i>scan-to-CAD-to-print</i>.</p> <p>Procedimiento técnico documentado para su aplicación en prácticas académicas y proyectos experimentales.</p> <p>Guía metodológica para la ejecución de ingeniería inversa y fabricación de prototipos.</p> | <p>Revisión documental y análisis de procesos.</p> <p>Elaboración de diagramas en software CAD.</p> <p>Sistematización metodológica mediante fichas técnicas y protocolo operativo del laboratorio.</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Seleccionar los equipos, software y recursos tecnológicos necesarios para la implementación del</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <p>Identificación y evaluación de escáner 3D, software de reconstrucción CAD y equipos de impresión</p>                                                                                                                                                                                      | <p>Sistema integrado de digitalización e impresión 3D operativo y calibrado.</p>                                                                                                                                                                                                                | <p>Análisis técnico de especificaciones.</p> <p>Configuración de software CAD y herramientas de</p>                                                                                                     |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>sistema de digitalización e impresión 3D, justificando la elección mediante criterios técnicos que garanticen su operatividad y aplicación en actividades académicas e ingeniería inversa.</p>                                                                                                                                                                                                                                | <p>3D adecuados al laboratorio.</p> <p>Configuración del sistema integrado y pruebas de funcionamiento.</p> <p>Capacitación inicial de uso y verificación de compatibilidad operativa.</p>                                                                                             | <p>Equipamiento tecnológico funcional e instalado en el laboratorio.</p> <p>Personal académico capacitado para la utilización del sistema.</p>                                                                                                          | <p>manufactura aditiva.</p> <p>Pruebas de funcionamiento y calibración. Bitácora de integración tecnológica y actas de validación operativa.</p>                                                                   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Desarrollar prototipos experimentales a partir de piezas electromecánicas digitalizadas, evaluando el funcionamiento del sistema implementado mediante el análisis dimensional comparativo entre las piezas originales, los modelos escaneados y los prototipos impresos, y cuantificando las desviaciones obtenidas respecto a tolerancias aceptables en el ámbito académico.</li> </ul> | <p>Selección de piezas electromecánicas para ingeniería inversa.</p> <p>Digitalización tridimensional y reconstrucción geométrica paramétrica.</p> <p>Fabricación de prototipos mediante impresión 3D.</p> <p>Evaluación funcional y análisis dimensional de las piezas obtenidas.</p> | <p>Prototipos experimentales fabricados a partir de piezas digitalizadas.</p> <p>Validación del funcionamiento del sistema implementado.</p> <p>Evidencias técnicas aplicadas en prácticas académicas y actividades experimentales del laboratorio.</p> | <p>Uso de escáner 3D, software CAD y laminadores de impresión 3D.</p> <p>Ensayos funcionales y verificación dimensional.</p> <p>Registro fotográfico, informes técnicos y reporte de validación de prototipos.</p> |

## 7. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

### 7.1. Tecnología de Escaneo Tridimensional

El escaneo tridimensional (3D) es una tecnología de adquisición de datos geométricos que permite obtener una representación digital precisa de la superficie de un objeto físico sin necesidad de contacto directo con el mismo. Mediante la captura de miles de puntos en el espacio tridimensional, denominada nube de puntos, el sistema genera un modelo digital que reproduce fielmente la geometría del objeto original, expresada en coordenadas X, Y, Z [5].

Desde el punto de vista tecnológico, los sistemas de escaneo 3D se clasifican en dos grandes categorías según su principio de medición:

#### 7.1.1. Sistemas de contacto (CMM)

Las Máquinas de Medición por Coordenadas (CMM, por sus siglas en inglés: Coordinate Measuring Machine) emplean una sonda física que toca directamente la superficie del objeto. Aunque proporcionan una precisión muy alta (del orden de micrómetros), su aplicación resulta lenta, requieren equipamiento costoso y pueden dañar piezas de geometría compleja o materiales blandos. Su uso está restringido principalmente a entornos industriales de control de calidad de alta precisión [7].

#### 7.1.2. Sistemas sin contacto (ópticos)

Los sistemas ópticos capturan la geometría superficial mediante proyección de luz o emisión láser, sin necesidad de tocar el objeto. Dentro de esta categoría se distinguen las siguientes tecnologías principales:

**Tabla 2.** Comparativa de tecnologías de escaneo tridimensional sin contacto. [5]

| Tecnología                         | Principio de funcionamiento                                                                                                                      | Exactitud típica | Aplicación principal                               |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------------|
| Luz estructurada (LED azul/blanca) | Proyecta patrones de luz codificados sobre el objeto y calcula la deformación de los patrones con sensores ópticos (principio de triangulación). | 0,01 – 0,05 mm   | Ingeniería inversa, prototipado, museos, medicina. |

|                       |                                                                                                                                             |               |                                                        |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------------|
| Láser triangulación   | Emite una línea o punto láser y mide el ángulo de reflexión en un sensor CCD para determinar la posición del punto.                         | 0,02 – 0,1 mm | Inspección industrial, metrología, control de calidad. |
| Tiempo de vuelo (ToF) | Mide el tiempo que tarda un pulso láser en ir y volver al objeto para calcular la distancia.                                                | 1 – 5 mm      | Arquitectura, topografía, objetos de gran escala.      |
| Fotogrametría         | Reconstruye geometría 3D a partir de múltiples fotografías tomadas desde distintos ángulos, mediante algoritmos de correlación de imágenes. | 0,1 – 1 mm    | Arqueología, construcción, documentación patrimonial.  |

Para aplicaciones de ingeniería inversa a escala de laboratorio, los sistemas de luz estructurada y láser de triangulación representan la mejor relación entre precisión, portabilidad y costo, siendo los más empleados en entornos académicos e industriales medianos [5], [7].

### 7.1.3. Proceso de generación de la nube de puntos y malla 3D

El proceso de digitalización sigue una secuencia de tres fases: (1) captura de datos, donde el escáner registra coordenadas de superficie y genera la nube de puntos bruta; (2) procesamiento, que incluye filtrado de ruido, alineación de escaneos parciales y fusión de nubes; y (3) reconstrucción de malla, en la que la nube de puntos se convierte en una malla poligonal triangulada, normalmente exportada en formato STL (Standard Tessellation Language / Lenguaje de Teselado Estándar) para su uso en software CAD o de manufactura aditiva [5], [6].

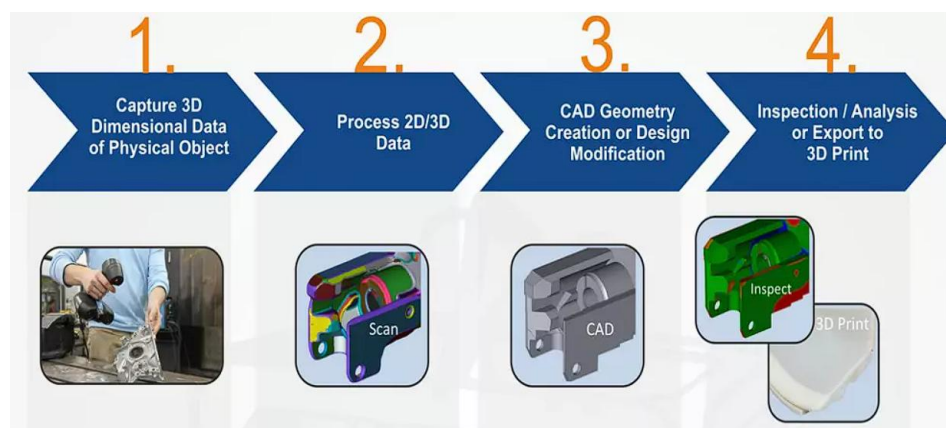
## 7.2. Ingeniería Inversa y Digitalización Tridimensional

La ingeniería inversa constituye un proceso técnico-científico orientado a la obtención, análisis y reconstrucción de la geometría y las características funcionales de un componente físico, con el propósito de generar un modelo digital que permita su reproducción, rediseño o fabricación mediante tecnologías de manufactura avanzada. En el ámbito de la ingeniería electromecánica, este procedimiento adquiere relevancia debido a su aplicación en la recuperación de piezas obsoletas,

reproducción de componentes sin documentación técnica y desarrollo de prototipos funcionales para fines académicos y experimentales [5], [6]. La integración de la digitalización tridimensional, el modelado paramétrico y la manufactura aditiva genera un flujo de trabajo sistematizado que permite transportar el objeto físico al modelo digital y, después, al prototipo fabricado articulando principios de metrología, Computer-Aided Design y validación geométrica. Desde la perspectiva metodológica, la digitalización tridimensional se erige como el primer eslabón del proceso de ingeniería inversa y se apoya en la captura de la geometría superficial del objeto a través de sensores ópticos o láser, capaces de generar una nube de puntos de alta densidad. Este conjunto de datos constituye una representación métrica del objeto y sirve como insumo para el posterior proceso de mallado, reconstrucción geométrica y modelado paramétrico. El uso de técnicas de escaneo 3D permite obtener reproducciones geométricas con altos niveles de precisión y repetibilidad, lo que resulta fundamental para el análisis dimensional, la evaluación de tolerancias y la fidelidad del prototipo fabricado respecto del componente original [6], [7].

En el contexto del presente proyecto, el proceso de trabajo responde a un esquema estructurado del tipo scan-to-CAD-to-print, en el cual el objeto físico es digitalizado, procesado y reconstruido en un entorno CAD para finalmente ser fabricado mediante impresión 3D. Este flujo de trabajo permite la integración de actividades de captura geométrica, depuración de malla, parametrización de superficies y validación dimensional, consolidando una metodología técnica aplicable a prácticas académicas, proyectos experimentales y procesos de formación profesional en el laboratorio de Electromecánica.

**Figura 1.** Esquema general del flujo de trabajo de ingeniería inversa scan-to-CAD-to-print. [2]



La Figura 1 representa el flujo de trabajo del ciclo scan-to-CAD-to-print, cuyas etapas se describen a continuación:

- a. **Paso 1** - Captura de datos 3D del objeto físico: El proceso comienza con el escaneo de la pieza física en un escáner 3D Seal Lite, que es un escáner 3D láser estructurado que proyecta patrones de luz estructurada LED azul sobre la superficie del objeto y captura su deformación con detectores ópticos, dando una nube de puntos densa con las coordenadas espaciales (X, Y, Z) de miles de puntos de la superficie del componente [5], [7].
- b. **Paso 2** - Procesamiento de datos 2D/3D: La nube de puntos cruda se procesa en el software JMStudio para eliminar ruido, fusionar escaneos parciales tomados desde diferentes ángulos y realizar la malla poligonal triangulada. Se exporta a formato STL (Standard Tessellation Language, Lenguaje de Teselado Estándar) que representa la geometría superficial del objeto mediante un conjunto de triángulos orientados [6].
- c. **Paso 3** — Creación de geometría CAD o modificación del diseño (CAD Geometry Creation or Design Modification): Se importa el STL en un software CAD en el que se reproduce la geometría geométrica paramétrica del objeto tridimensional correspondiente, así las superficies de la creación malla pasan a ser entidades geométricos editables (planos, cilindros, esferas), permitiendo corregir problemas originados por el escaneo, adecuar las tolerancias de la dimensión y preparar el modelo para la fabricación [9].
- d. **Paso 4** — Inspección, análisis o exportación para impresión 3D (Inspection / Analysis or Export to 3D Print): Se lleva a cabo la impresión 3D FDM , el modelo CAD paramétrico se procesa mediante un software de laminado (slicer), donde se divide en capas y se genera el G-code con las instrucciones de movimiento, temperatura, velocidad, etc. La impresora 3D FDM hace la fabricación mediante el comportamiento de las capas de filamento fundido hasta completar el prototipo, y finalmente se comprueba dimensionalmente con calibrador vernier la correspondencia geométrica con la acordada con la pieza original [3], [23].

#### **7.2.1. Conceptualización de la ingeniería inversa en sistemas electromecánicos**

La ingeniería inversa aplicada a sistemas electromecánicos se basa en el estudio del comportamiento geométrico y funcional de los componentes mecánicos, estructurales y de ensamble, con el objetivo de generar información técnica que permita su documentación, rediseño o reproducción. Este proceso se apoya en principios de análisis dimensional, caracterización

geométrica y reconstrucción funcional, constituyéndose en una herramienta de alto valor en procesos de mantenimiento, actualización tecnológica, fabricación de repuestos y desarrollo de prototipos de estudio. En entornos académicos, su aplicación fortalece el aprendizaje práctico y promueve el desarrollo de competencias asociadas al diseño asistido por computadora, la manufactura digital y la experimentación aplicada [6], [8].

### 7.2.2. Tecnologías de escaneo tridimensional

Las tecnologías de digitalización tridimensional utilizadas en ingeniería inversa pueden clasificarse principalmente en sistemas basados en luz estructurada, triangulación láser y fotogrametría digital. Los escáneres de luz estructurada proyectan patrones luminosos sobre la superficie del objeto y recogen la deformación del patrón proyectado para permitir estimar la posición espacial de los puntos, lo que permite realizar tomas rápidas y con una alta resolución superficial. Los sistemas basados en láser utilizan una línea de luz coherente que avanza a lo largo de la superficie del objeto, presentando mejor estabilidad ante variaciones de la iluminación y un mejor desempeño en superficies con un bajo índice de reflectancia. La fotogrametría, por su parte, se fundamenta en el procesamiento de múltiples imágenes y, aunque presenta menor precisión en piezas pequeñas, resulta útil para objetos de mayor escala o morfología compleja [5], [7].

**Tabla 3.** Comparación técnica de tecnologías de digitalización tridimensional aplicadas a ingeniería inversa.

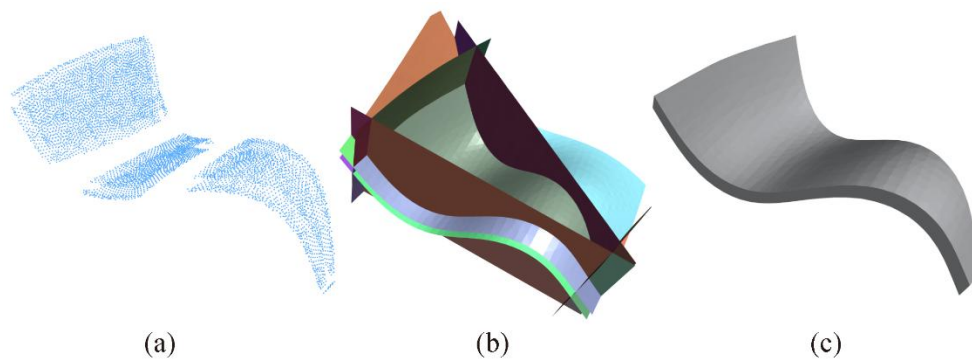
| <b>Tecnología de Escaneo 3D</b> | <b>Principio de Funcionamiento</b> | <b>Precisión Típica</b> | <b>Ventajas Técnicas en Ingeniería Electromecánica</b> | <b>Limitaciones Operativas</b> |
|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------|
|                                 |                                    |                         |                                                        |                                |

|                              |                                                                                                                                                                                        |                       |                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                         |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Luz estructurada</b>      | Proyección de patrones luminosos sobre la superficie del objeto y captura de la deformación del patrón mediante cámaras ópticas para calcular la posición de cada punto en el espacio. | 0.04 mm – 0.10 mm     | Resolución superficial alta, alta velocidad de adquisición, un sistema adecuado para la adquisición de piezas pequeñas/medianas con geometrías finas.                              | Sensible a superficies brillantes o transparentes, necesita preparación superficial o recubrimientos mate.; sensible a condiciones de alta iluminación. |
| <b>Triangulación láser</b>   | Emisión de un haz láser que recorre la superficie del objeto, cálculo de coordenadas espaciales mediante principios de triangulación geométrica.                                       | 0.02 mm – 0.05 mm     | Mayor estabilidad frente a variaciones de iluminación, buen desempeño en superficies oscuras o con bajo índice de reflectividad, apropiado para componentes mecánicos funcionales. | Velocidad de captura inferior a la luz estructurada, desempeño limitado en superficies altamente pulidas o especulares.                                 |
| <b>Fotogrametría digital</b> | Obtención de múltiples imágenes 2D desde diferentes ángulos y reconstrucción tridimensional mediante algoritmos de correlación y reproyección geométrica.                              | Variable (media–baja) | Bajo costo de implementación, adecuada para objetos de gran tamaño o geometría extensa, útil para documentación volumétrica general.                                               | Precisión limitada en piezas pequeñas, dependiente de condiciones de iluminación y calidad de imagen, mayor tiempo de procesamiento.                    |

|                              |                                                                                                                                    |             |                                                                                             |                                                                                                            |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Tiempo de vuelo (ToF)</b> | Emisión de pulsos láser y medición del tiempo de retorno para determinar la distancia y generar modelos espaciales de gran escala. | Milimétrica | Adecuada para escaneo de estructuras, equipos de gran tamaño y entornos espaciales amplios. | No apta para ingeniería inversa de piezas mecánicas de precisión ni aplicaciones de prototipado funcional. |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### 7.2.3. Procesamiento de nubes de puntos y generación de mallas

Una vez concluida la captura geométrica, la nube de puntos obtenida requiere un proceso de depuración, alineación y mallado orientado a la generación de una superficie tridimensional continua. Esta etapa incluye operaciones de eliminación de ruido, corrección de discontinuidades, unión de escaneos parciales y generación de mallas trianguladas en formatos compatibles con software CAD y de manufactura aditiva. El adecuado tratamiento de la malla es determinante para evitar deformaciones, pérdidas geométricas o errores dimensionales que afecten la precisión del modelo reconstruido y, consecuentemente, del prototipo fabricado [6], [8].

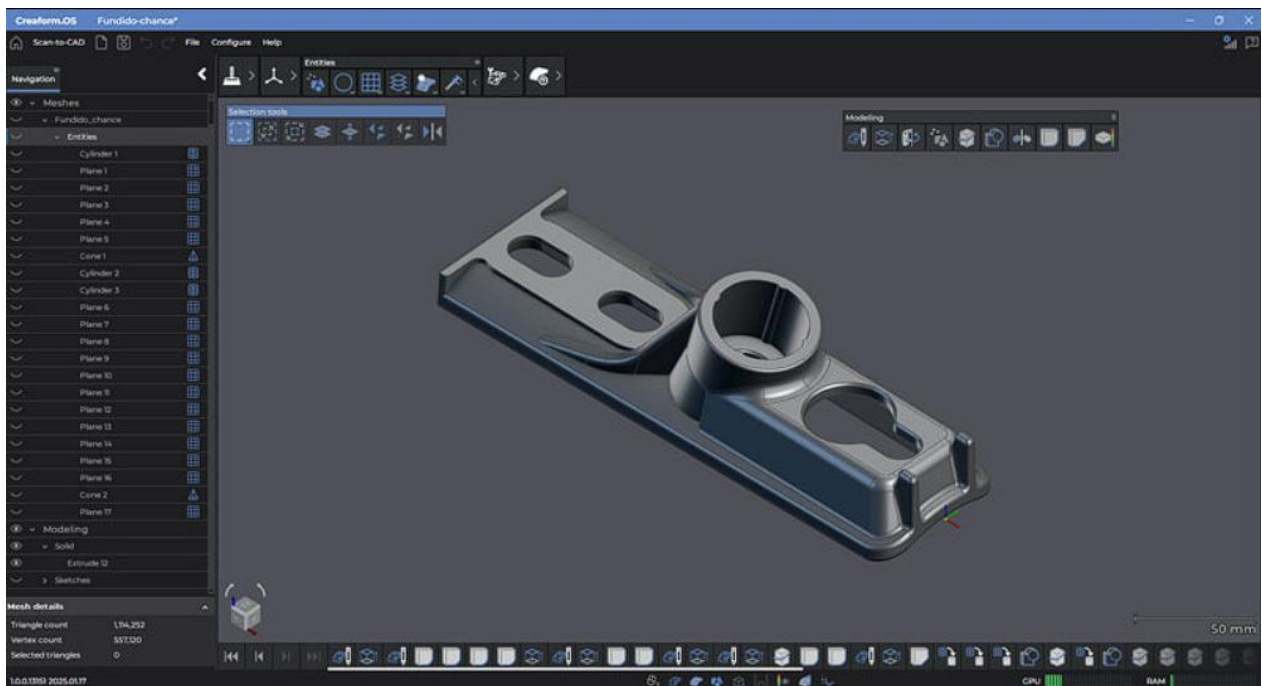


**Figura 2.** Proceso de reconstrucción de malla a partir de nube de puntos digitalizada. [8]

### 7.2.4. Reconstrucción geométrica paramétrica en CAD

La reconstrucción geométrica paramétrica constituye la fase en la que la malla digital es utilizada como referencia para la generación de un modelo CAD editable. En esta etapa se definen planos, ejes, superficies y perfiles característicos que permiten reproducir la geometría del objeto mediante

operaciones de extrusión, revolución y barrido, garantizando la coherencia dimensional del componente. A su vez, el modelo paramétrico posibilita ajustes de diseño, análisis de tolerancias y posterior validación a través de mapas de desviación y comparaciones métricas entre el modelo digital, la malla y el prototipo fabricado [7], [8].



**Figura 3.** Modelo CAD paramétrico obtenido a partir de la reconstrucción de una pieza digitalizada. [7]

### 7.3. Manufactura Aditiva e Impresión 3D

La manufactura aditiva constituye un conjunto de procesos de fabricación basados en la producción de objetos tridimensionales por adición sucesiva de material, a partir de modelos digitales obtenidos mediante software CAD o mediante reconstrucción geométrica derivada de procesos de ingeniería inversa. A diferencia de los métodos sustractivos tradicionales, la manufactura aditiva permite la fabricación de geometrías complejas, la optimización de material y la reducción de tiempo en etapas de prototipado y validación funcional, razón por la cual se ha consolidado como una herramienta de alto valor en el ámbito académico, investigativo e industrial [9], [10].

En el contexto de la ingeniería electromecánica, la impresión 3D facilita el desarrollo de prototipos estructurales, componentes de prueba, carcasas técnicas, adaptadores mecánicos y piezas funcionales de baja carga, constituyéndose en un recurso didáctico y experimental que fortalece la formación práctica de los estudiantes y la aplicación de metodologías de diseño y fabricación

avanzada. Asimismo, la integración del sistema de manufactura aditiva con el proceso scan-to-CAD-to-print permite cerrar el ciclo de trabajo entre digitalización, modelado paramétrico y validación física de componentes, fortaleciendo la relación entre análisis computacional y experimentación aplicada [10], [11].



**Figura 4.** Esquema general del proceso de manufactura aditiva aplicado al prototipado electromecánico. [10]

### 7.3.1. Tecnologías de impresión 3D aplicadas a prototipado electromecánico

Las tecnologías de impresión 3D más empleadas en entornos académicos e industriales vinculados al diseño y fabricación de prototipos electromecánicos corresponden principalmente a los procesos FDM (Modelado por Deposición Fundida), SLA (Estereolitografía) y SLS (Sinterizado Selectivo por Láser). Cada una de estas tecnologías presenta características, alcances y limitaciones asociadas a la precisión, resistencia mecánica, comportamiento del material y costo operativo, por lo que su selección depende del propósito funcional del prototipo y del contexto de uso del laboratorio [9], [11].

### 7.3.2. Impresoras 3D: Tecnología y Principios de Manufactura Aditiva

Una impresora 3D es un sistema de fabricación digital que construye objetos físicos tridimensionales mediante la deposición o solidificación sucesiva de capas de material, siguiendo las instrucciones geométricas definidas en un modelo digital. A diferencia de los procesos de manufactura sustractiva (torneado, fresado), la manufactura aditiva no elimina material, sino que

lo acumula capa a capa hasta obtener la geometría deseada, lo que permite fabricar formas complejas con menor desperdicio de material [3], [20].

La norma ISO/ASTM 52900 clasifica los procesos de manufactura aditiva en siete categorías según el mecanismo de consolidación del material. Las tecnologías más relevantes para aplicaciones académicas e industriales de prototipado son:

**Tabla 4.** Principales tecnologías de impresión 3D aplicadas al prototipado académico e industrial.

| <b>Tecnología</b>                                                 | <b>Principio de funcionamiento</b>                                                                                                                                                                                                                 | <b>Material principal</b>  | <b>Características relevantes</b>                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| FDM – Modelado por Deposición Fundida (Fused Deposition Modeling) | Un filamento termoplástico se funde y se extruye a través de una boquilla caliente que se desplaza sobre una cama de impresión, depositando el material capa a capa.                                                                               | PLA, ABS, PETG, TPU, Nylon | Bajo costo, fácil operación, amplia disponibilidad de materiales, resolución 0,1–0,3 mm. Ideal para laboratorios académicos y prototipado funcional.                                          |
| SLA – Estereolitografía (Stereolithography Apparatus)             | Esta técnica utiliza un láser UV que fotopolimeriza selectivamente una resina líquida con mejoría en fotosensibilidad. La construcción del objeto se hace desde la base hasta la parte superior o desde la parte superior hasta la parte inferior. | Resinas fotopolimerizables | La calidad de las resinas fotopolimerizables es de alta resolución (0,025–0,05 mm) y un excelente acabado superficial, pero necesita un post-curado UV y además trabajar con resinas con EPP. |

|                                                                   |                                                                                                                                       |                                        |                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SLS – Sinterizado Selectivo por Láser (Selective Laser Sintering) | Un láser de alta potencia sinteriza las capas de polvo (nylon, metal, cerámica), para fusionar las partículas y obtener la geometría. | Nylon, PA12, titanio, acero inoxidable | No requiere estructuras de soporte, piezas funcionales de alta resistencia. Alto costo, uso industrial avanzado. |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### 7.3.3. Proceso de impresión FDM: flujo desde el archivo digital hasta la pieza

El proceso FDM opera según la siguiente secuencia: (1) el modelo 3D en formato STL o 3MF es importado en el software de laminado (slicer); (2) el slicer segmenta el modelo en capas horizontales y genera el código G (G-code), que contiene todas las instrucciones de movimiento, temperatura y velocidad para la impresora; (3) la impresora ejecuta el G-code, calentando la boquilla a la temperatura de extrusión del material (190–230 °C para PLA) y depositando el filamento fundido capa a capa sobre la cama calefactada; (4) cada capa se solidifica por enfriamiento antes de que comience la siguiente, hasta completar el objeto [3], [23].

Los parámetros críticos del proceso FDM que determinan la calidad dimensional y mecánica del prototipo son la altura de capa, la velocidad de impresión, la temperatura de extrusión, el porcentaje y patrón de relleno (infill), y el diseño de las estructuras de soporte para voladizos superiores a 45°

### 7.3.4. Materiales utilizados en impresión 3D

La selección del material constituye un factor determinante en el desempeño funcional del prototipo, ya que las propiedades mecánicas, térmicas y químicas del polímero impreso condicionan su resistencia estructural, estabilidad dimensional y vida útil. En el ámbito académico-experimental, materiales como PLA y PETG son empleados para fines didácticos y de validación geométrica, mientras que polímeros técnicos como ABS, Nylon o compuestos reforzados se orientan a aplicaciones que requieren mayor tenacidad o resistencia térmica. La correcta selección del material debe responder al tipo de esfuerzo al que será sometida la pieza y a los requerimientos funcionales del ensayo o práctica de laboratorio [10], [12].



**Figura 5.** Comparación morfológica y estructural de piezas impresas con diferentes materiales poliméricos [10]

### 7.3.5. Post-procesamiento y acondicionamiento de prototipos

El proceso de impresión 3D suele complementarse con etapas de post-procesamiento, entre las que se incluyen la eliminación de soportes, lijado superficial, ensamblaje, corrección dimensional, limpieza de residuos y, en el caso de resinas, procesos de lavado y post-curado. Estas actividades permiten mejorar el acabado superficial, optimizar el ajuste geométrico, incrementar la estabilidad estructural y preparar el prototipo para su posterior fase de evaluación funcional y validación dimensional dentro del laboratorio [9], [12].



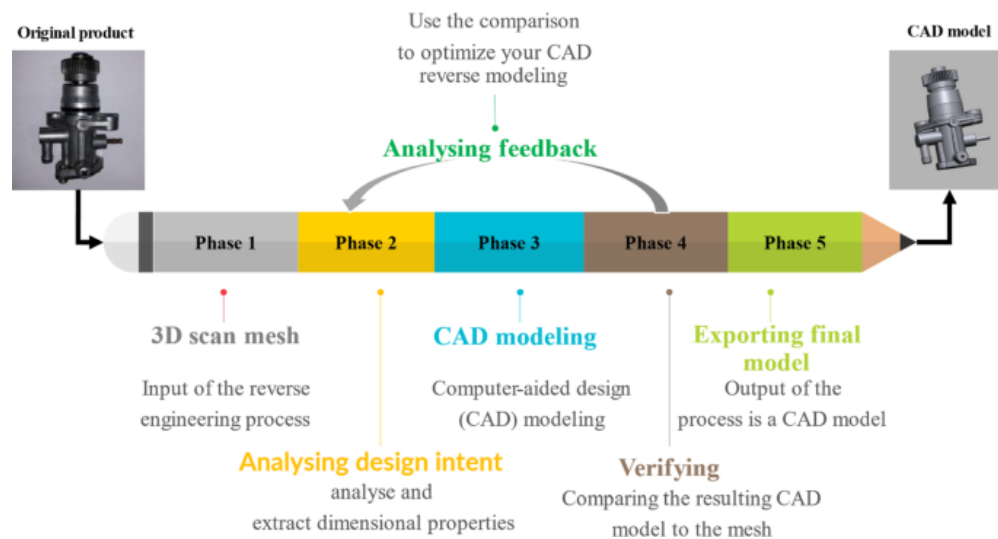
**Figura 6.** Proceso de post-procesamiento y acondicionamiento de un prototipo fabricado mediante impresión 3D.

#### **7.4. Integración de Sistemas de Digitalización 3D y Manufactura Aditiva en Entornos de Formación en Ingeniería**

La integración de sistemas de digitalización 3D, CAD y fabricación aditiva en cursos de ingeniería satisface la necesidad de unir herramientas digitales y tecnologías de fabricación avanzada en un único flujo tecnológico. Con carácter conceptual, esta interconexión gira en torno al enfoque de digitalizar-para-diseñar-para-imprimir, en el que una pieza física es digitalizada, luego reconstruida geométricamente y finalmente impresa en 3D, constituyendo un ciclo que une ingeniería inversa y prototipado [13], [14].

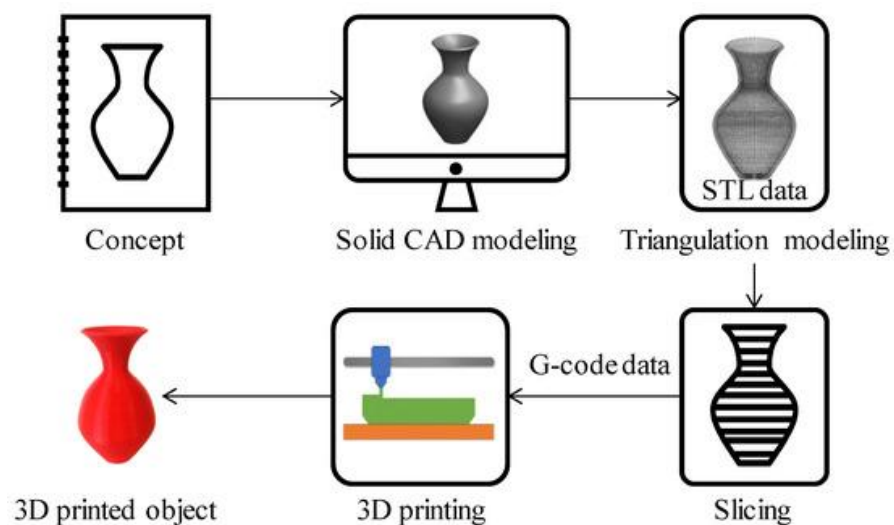
Desde una perspectiva científica, la literatura asegura que la integración de estos sistemas no sólo significa tener equipos y software capaces de coexistir, sino que en realidad habla sobre la interoperación que existe entre plataformas de captura geométrica, herramientas de parametrización CAD y tecnologías de fabricación aditiva, siendo posible la transferencia uniforme de información entre las diferentes fases del proceso. Este tipo de integración puede favorecer la trazabilidad de los modelos digitales, así como la disminución de los errores dimensionales, favorece la creación de entornos de experimentación con una clara orientación hacia la educación centrada en el prototipado y la validación técnica [14], [15].

En el marco de la educación en ingeniería, se considera que la conexión entre el escaneado 3D y la manufactura aditiva es un recurso valioso de aprendizaje de competencias profesionales relacionadas con el diseño asistido por ordenador, el análisis geométrico, la modificación de elementos y la revisión funcional de los mismos, lo que permite la unión de la teoría con la práctica. Algunos autores argumentan que la integración de sistemas de prototipado puede facilitar la comprensión de conceptos como los relacionados con las tolerancias dimensionales, el comportamiento del material, o la adaptación del diseño a los procesos de producción de elementos; todo ello uno de los conocimientos relevantes para el ámbito de la ingeniería mecánica y electromecánica [13], [16].



**Figura 7.** Esquema conceptual de integración entre digitalización 3D, modelado CAD y manufactura aditiva en entornos académicos. [13]

De igual manera, la integración tecnológica en laboratorios universitarios se fundamenta en principios de gestión del conocimiento tecnológico, dado que estos sistemas permiten la transferencia bidireccional entre el análisis digital y la experimentación física. La consolidación de este ecosistema formativo promueve entornos de aprendizaje activos basados en prototipado iterativo, donde los estudiantes participan en procesos de diagnóstico geométrico, rediseño y validación estructural, alineando el desarrollo académico con escenarios reales de diseño y fabricación en la industria moderna [15], [16].



**Figura 8.** Representación conceptual del ciclo formativo basado en ingeniería inversa y prototipado mediante manufactura aditiva. [15]

En consecuencia, la convergencia de los sistemas de digitalización 3D y la manufactura aditiva constituye un dispositivo tecnológico–pedagógico de alta efectividad y robustez dentro de la formación en ingeniería, en la medida en que se articula el uso de herramientas digitales, procesos de fabricación avanzada, y prácticas de validación experimental en el marco de una misma configuración teórica. Esto otorga a la fundamentación científica la justificación adecuada en la medida en que plantea la pertinencia del uso de sistemas digitales en educación, convirtiéndose en soporte a las actividades de investigación aplicada, desarrollo de prototipos y simulación de escenarios de diseño industrial.

### **7.5. Impacto Tecnológico en la Formación de Ingeniería**

La incorporación de tecnologías de digitalización tridimensional, modelado paramétrico e impresión 3D en los procesos de enseñanza–aprendizaje en el ámbito de la ingeniería ha sido mirada a través de la perspectiva de las competencias técnicas y cognitivas que permite desarrollar en relación con el diseño, la experimentación aplicada o la resolución de problemas tecnológicos. Desde la perspectiva más educacional, las herramientas tecnológicas incorporadas permiten superar modelos tradicionales de enseñanza hacia métodos de aprendizaje activo basados en el prototipado, la simulación y la validación, lo que permite a los estudiantes interactuar y experimentar con procesos que explotan la interacción entre análisis digital y la materialización física del diseño [17], [18].

Diversos estudios señalan que el uso de tecnologías asociadas a la ingeniería inversa y la manufactura aditiva fortalece competencias relacionadas con el pensamiento espacial, la interpretación geométrica, la toma de decisiones técnicas y la adaptación del diseño a las restricciones del proceso de fabricación. Este enfoque favorece la comprensión del ciclo completo de desarrollo de un producto, desde la captura geométrica y el modelado CAD hasta la evaluación dimensional del prototipo fabricado, promoviendo una formación orientada a la práctica profesional y al razonamiento ingenieril basado en evidencia experimental [18], [19].

También, la integración de estos recursos tecnológicos contribuye a la consolidación de un entorno formativo alineado con los retos de la transición hacia la Industria 4.0, en el cual convergen procesos digitales, automatización, manufactura inteligente y gestión de datos. En este contexto, la digitalización 3D y la impresión aditiva se constituyen en herramientas estratégicas para el

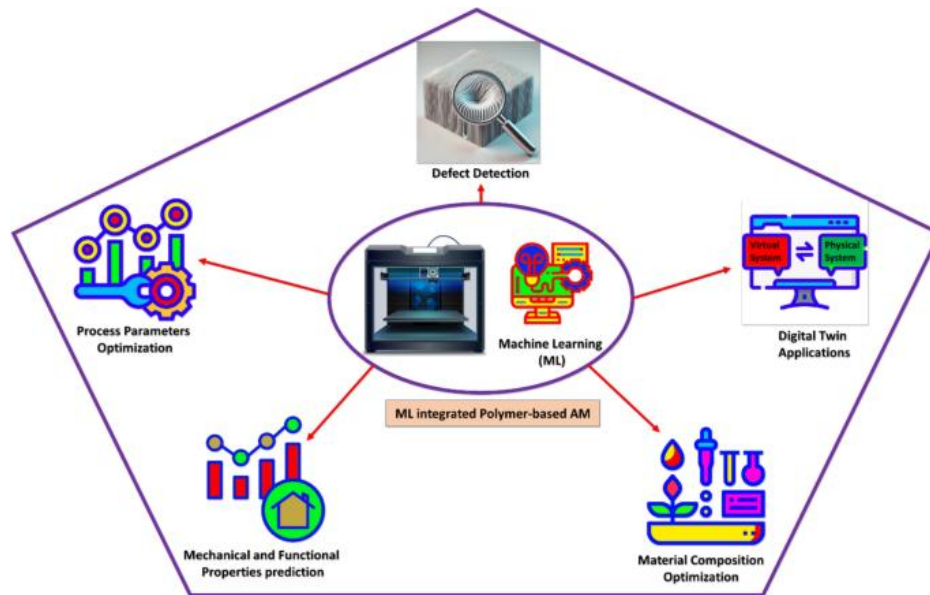
desarrollo de capacidades asociadas a la innovación tecnológica, el rediseño funcional de componentes y la experimentación con soluciones de bajo costo y rápida iteración [17], [20].

Con el fin de sintetizar el aporte formativo de estas tecnologías en la ingeniería, se presenta la siguiente relación entre competencias desarrolladas y resultados de aprendizaje asociados al uso académico del ciclo scan-to-CAD-to-print.

**Tabla 5.** Contribución de la digitalización 3D y la manufactura aditiva al desarrollo de competencias en formación de ingeniería

| <b>Dimensión Formativa</b>   | <b>Competencia Desarrollada</b>                        | <b>Resultado de Aprendizaje Asociado</b>                                               |
|------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Diseño y modelado geométrico | Representación espacial y parametrización CAD          | Capacidad para modelar componentes y adaptar su geometría a requerimientos funcionales |
| Análisis técnico             | Comprensión de tolerancias y validación dimensional    | Evaluación de desajustes, desviaciones y mejoras en el diseño del prototipo            |
| Innovación y rediseño        | Prototipado iterativo y optimización de piezas         | Formulación de soluciones alternativas a partir de pruebas experimentales              |
| Integración digital-física   | Relación entre simulación y materialización del diseño | Transferencia coherente entre modelo digital y pieza fabricada                         |
| Aprendizaje aplicado         | Resolución de problemas tecnológicos reales            | Desarrollo de proyectos experimentales con enfoque práctico y validación funcional     |

En este sentido, la literatura especializada destaca que el acceso a tecnologías de digitalización e impresión 3D fortalece no solo el desarrollo técnico del estudiante, sino también habilidades transversales tales como el trabajo colaborativo, el razonamiento crítico, la creatividad ingenieril y la capacidad de análisis experimental, elementos esenciales para su desempeño en entornos académicos, investigativos e industriales contemporáneos [18], [20].



**Figura 9.** Representación conceptual del impacto formativo del ciclo scan-to-CAD-to-print en los procesos de aprendizaje en ingeniería. [18]

Además, el impacto tecnológico de la digitalización 3D y la manufactura aditiva en la formación de ingeniería se fundamenta en su capacidad para articular teoría, práctica y experimentación aplicada, consolidando entornos de aprendizaje que reproducen con mayor fidelidad los escenarios reales de diseño, fabricación y validación técnica presentes en la ingeniería moderna.

### 7.6. Control de Calidad, Metrología y Validación Dimensional de Prototipos

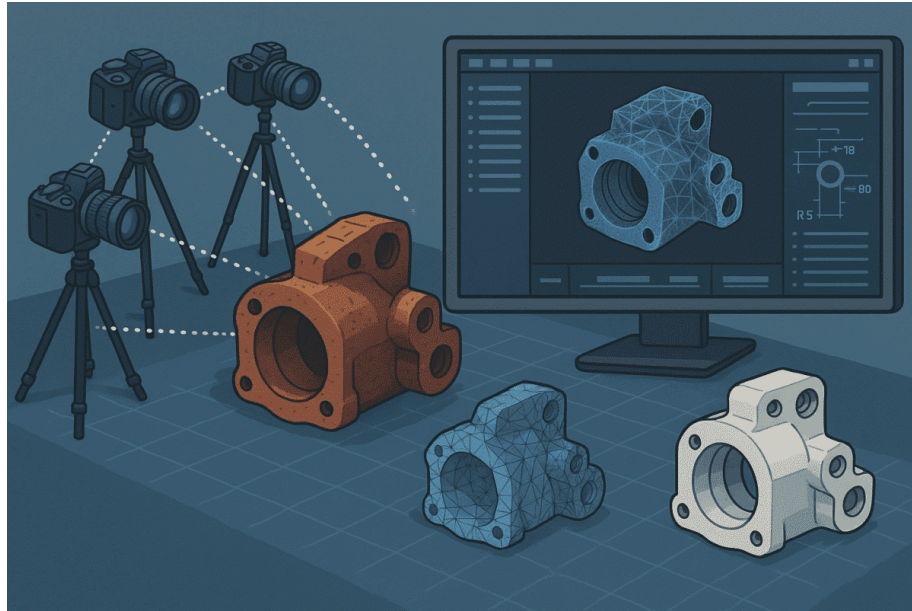
El control de calidad aplicado a prototipos fabricados mediante manufactura aditiva se fundamenta en los principios de la metrología dimensional, disciplina orientada a la medición, verificación y evaluación de las características geométricas de una pieza con respecto a su modelo de referencia. En el contexto del ciclo scan-to-CAD-to-print, la validación dimensional constituye una etapa esencial para determinar el grado de correspondencia entre el diseño digital y el prototipo físico, permitiendo identificar desviaciones geométricas, errores de fabricación y discrepancias asociadas al proceso de impresión [21], [22].

Desde una perspectiva científica, la literatura señala que los procesos de validación de prototipos impresos en 3D se sustentan en la comparación entre:

- (1) el modelo CAD paramétrico,

- (2) la malla digital obtenida por escaneo tridimensional del prototipo, y
- (3) la pieza física fabricada.

Este procedimiento posibilita la generación de mapas de desviación, análisis de tolerancias y curvas de error geométrico, herramientas ampliamente utilizadas en ingeniería inversa, control dimensional y aseguramiento de la calidad del producto [22], [23].



**Figura 10.** Esquema conceptual de validación dimensional entre modelo CAD, malla escaneada y prototipo físico.[22]

#### **7.6.2. Principios de evaluación dimensional en prototipos fabricados mediante manufactura aditiva**

La validación dimensional se basa en la medición de parámetros como error medio absoluto, desviación máxima puntual, circularidad, paralelismo, rugosidad superficial y variación volumétrica, los cuales permiten cuantificar el comportamiento geométrico del prototipo. Estos indicadores se relacionan directamente con factores propios del proceso de impresión, tales como orientación de capas, contracción térmica, anisotropía mecánica y resolución del equipo de fabricación [21], [23].

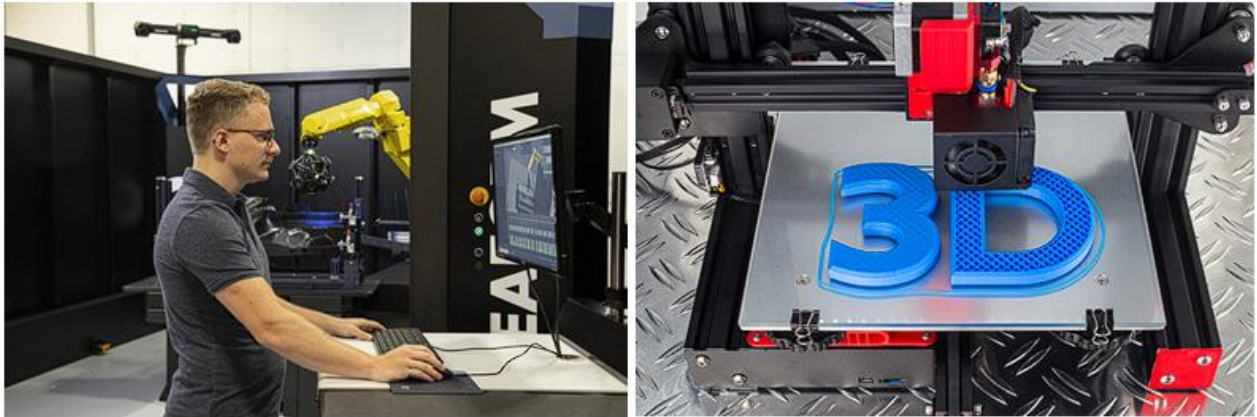
Con el fin de sistematizar los principales parámetros utilizados en la evaluación de prototipos impresos, se presenta la siguiente clasificación de indicadores dimensionales.

**Tabla 6.** Parámetros de evaluación dimensional aplicados al control de calidad de prototipos fabricados mediante impresión 3D. [23]

| <b>Parámetro de Evaluación</b> | <b>Descripción Técnica</b>                                                      | <b>Propósito de la Medición</b>                         |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Error absoluto medio (MAE)     | Diferencia promedio entre la geometría del modelo CAD y la superficie escaneada | Determinar la precisión global del prototipo            |
| Desviación máxima puntual      | Mayor diferencia registrada en un punto específico de la superficie             | Identificar zonas críticas de deformación o error       |
| Variación dimensional lineal   | Diferencia entre longitudes nominales y reales                                  | Verificar cumplimiento de tolerancias geométricas       |
| Circularidad y concentricidad  | Evaluación de perfiles y ejes geométricos                                       | Analizar estabilidad de formas rotacionales             |
| Rugosidad superficial          | Evaluación del acabado y textura de la pieza                                    | Determinar calidad funcional y estética del prototipo   |
| Deformación volumétrica        | Diferencia entre volumen teórico y volumen fabricado                            | Identificar contracción, expansión o distorsión térmica |

### **7.6.3. Ensayos funcionales y validación estructural en prototipos de aplicación ingenieril**

Aparte del análisis geométrico, la validación del prototipo puede complementar los ensayos funcionales y las pruebas de la adecuación mecánica para comprobar su funcionamiento en condiciones de operación controlada. Los ensayos funcionales abarcan el acoplamiento entre componentes, la estabilidad estructural, la adecuación del ensamblaje y la respuesta a cargas bajas, aspectos que permiten valorar la aplicabilidad del prototipo a los ámbitos académico y experimental [22], [24].



**Figura 11.** Representación conceptual del proceso de validación funcional de un prototipo aplicado a un sistema mecánico de prueba. [24]

#### **7.6.4. Criterios de aceptación técnica de prototipos fabricados mediante manufactura aditiva**

La aceptación técnica del prototipo depende de su correspondencia dimensional con el diseño original y de su desempeño funcional en la aplicación prevista. Para ello, se establecen criterios de evaluación que permiten clasificar el resultado del proceso de fabricación en categorías tales como: prototipo aceptable, prototipo con ajustes requeridos o prototipo no conforme. Estos criterios se apoyan en parámetros cuantitativos derivados del control metrológico, así como en la valoración cualitativa del comportamiento funcional del componente [23], [24].

**Tabla 7.** Criterios técnicos de aceptación y evaluación de conformidad de prototipos fabricados. [24]

| <b>Condición Evaluada</b>                                                      | <b>Resultado del Control Dimensional / Funcional</b> | <b>Clasificación Técnica</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------|
| Desviaciones dentro de tolerancias establecidas y adecuado desempeño funcional | Cumple con parámetros geométricos y operativos       | Prototipo aceptable          |

|                                                                              |                                                  |                                  |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------|
| Desviaciones moderadas corregibles mediante ajuste o reprocesamiento parcial | Requiere mejoras superficiales o dimensionales   | Prototipo con ajustes requeridos |
| Desviaciones críticas o incompatibilidad funcional con su propósito de uso   | No cumple con criterios de precisión y desempeño | Prototipo no conforme            |

El control de calidad y la validación dimensional constituyen componentes esenciales del proceso de prototipado basado en ingeniería inversa y manufactura aditiva, al garantizar la coherencia entre el modelo digital y la pieza fabricada, y asegurar que el prototipo cumpla con los requerimientos geométricos y funcionales establecidos para su uso académico y experimental.

### **7.7. Seguridad Operativa, Gestión de Riesgos y Condiciones de Laboratorio**

La operación de sistemas de digitalización tridimensional e impresión 3D en entornos académicos requiere la aplicación de principios de seguridad industrial, gestión de riesgos tecnológicos y control de condiciones ambientales, con el fin de garantizar la integridad de los usuarios, la estabilidad del equipamiento y la confiabilidad de los procesos de prototipado. Diversos autores señalan que la seguridad en laboratorios de manufactura aditiva se fundamenta en la identificación de riesgos asociados a temperatura, emisión de partículas, radiación óptica, carga eléctrica, manipulación de materiales y ergonomía operativa [25], [26].

Desde una perspectiva técnica, la gestión de riesgos en este tipo de laboratorios considera la existencia de fuentes térmicas activas, componentes mecánicos en movimiento, exposición a resinas o vapores y dispositivos de iluminación o proyección utilizados en escaneo óptico, los cuales requieren protocolos de operación segura y monitoreo ambiental. La correcta aplicación de estas medidas permite reducir la probabilidad de incidentes, prevenir fallos operativos y promover un entorno de aprendizaje responsable y controlado [26], [27].



**Figura 12.** Esquema conceptual de zonas de riesgo y áreas de seguridad en laboratorios con sistemas de escaneo 3D e impresión aditiva. [26]

#### 7.7.1. Seguridad en el uso de escáneres 3D e impresoras de manufactura aditiva

La operación de escáneres 3D basados en luz estructurada o proyección óptica requiere la aplicación de medidas de protección frente a intensidad lumínica, reflejos y exposición visual prolongada, especialmente en procesos de captura continua. En el caso de equipos de impresión 3D, los principales riesgos se asocian a altas temperaturas en boquillas, cámaras de impresión, placas calefactadas y emisiones derivadas del proceso térmico de los polímeros, por lo que es indispensable la implementación de dispositivos de ventilación localizada, señalización preventiva y restricciones de acceso durante el funcionamiento del equipo [25], [28].



**Figura 13.** Medidas de seguridad operativa aplicadas a sistemas de impresión 3D. [28]

### 7.7.2. Manejo seguro de materiales, filamentos y resinas técnicas

El almacenamiento y manipulación de materiales utilizados en manufactura aditiva debe realizarse bajo criterios de compatibilidad química, control de humedad, ventilación y uso de equipos de protección personal. En el caso de resinas fotopolimerizables, la literatura recomienda evitar el contacto dérmico directo, limitar la exposición a vapores y aplicar procedimientos de disposición adecuada de residuos; mientras que en materiales termoplásticos se prioriza la mitigación de emisiones de partículas ultrafinas y compuestos orgánicos volátiles durante el proceso de impresión [27], [29].

Con el fin de organizar los principales lineamientos técnicos de seguridad en el manejo de materiales, se presenta la siguiente síntesis.

**Tabla 8.** Medidas operativas de seguridad para el manejo de materiales utilizados en manufactura aditiva. [28]

| <b>Categoría de Material</b> | <b>Riesgo Asociado</b>                          | <b>Medida de Seguridad Recomendada</b>                |
|------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Filamentos termoplásticos    | Emisión de vapores y partículas                 | Ventilación localizada y monitoreo ambiental          |
| Resinas fotopolimerizables   | Contacto dérmico y toxicidad por exposición     | Uso de guantes, gafas y manipulación controlada       |
| Polvos técnicos (SLS)        | Dispersión de partículas y riesgo de inhalación | Almacenamiento cerrado y contención del material      |
| Adhesivos y solventes        | Vapores químicos e inflamabilidad               | Uso en áreas ventiladas y control de ignición         |
| Piezas recién impresas       | Superficies calientes o residuos químicos       | Tiempo de enfriamiento y limpieza técnica supervisada |

### 7.7.3. Condiciones ambientales y estabilidad operativa del laboratorio

El desempeño de los sistemas de escaneo y manufactura aditiva se encuentra directamente influenciado por variables ambientales tales como temperatura, humedad relativa, vibración

mecánica e interferencias eléctricas, las cuales inciden en la precisión de la captura geométrica y en la calidad de la fabricación del prototipo. Por esta razón, la literatura técnica recomienda operar en entornos controlados con superficies estables, iluminación adecuada, ausencia de corrientes de aire y suministro eléctrico protegido, garantizando la continuidad del proceso y la estabilidad del equipamiento [26], [28].

#### 7.7.4. Protocolos de mantenimiento preventivo y continuidad operativa

La seguridad operativa también se sustenta en la aplicación de mantenimientos preventivos, calibraciones periódicas y registro de uso del equipo, lo cual permite prolongar la vida útil de los sistemas y minimizar fallas inesperadas durante la ejecución de actividades académicas. Estos procedimientos incluyen verificación mecánica, limpieza técnica, revisión de componentes críticos y documentación de incidencias, alineándose con prácticas de aseguramiento de calidad en laboratorios de ingeniería [27], [29].

**Tabla 9.** Plan técnico de mantenimiento preventivo y seguimiento operativo del sistema. [29]

| Actividad de Mantenimiento                        | Periodicidad Referencial | Propósito Técnico                              |
|---------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------|
| Verificación de calibración y alineación óptica   | Periódica según uso      | Mantener precisión de captura geométrica       |
| Limpieza técnica de componentes y área de trabajo | Regular                  | Evitar contaminación de piezas y equipos       |
| Revisión mecánica de partes móviles y fijaciones  | Programada               | Prevenir fallas por desgaste o vibración       |
| Inspección de cableado y protección eléctrica     | Programada               | Garantizar estabilidad y continuidad operativa |
| Registro y trazabilidad del uso académico         | Continua                 | Documentar incidencias y control del sistema   |

La seguridad operativa, la gestión de riesgos y el control de condiciones de laboratorio constituyen elementos esenciales en la implementación y uso de sistemas de digitalización 3D y manufactura aditiva en entornos académicos, al garantizar la protección de los usuarios, la estabilidad del equipamiento y la confiabilidad de los procesos formativos y experimentales desarrollados en el laboratorio.

## **8. PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPOTESIS:**

¿De qué manera la implementación de un sistema integrado de digitalización tridimensional e impresión 3D contribuye al fortalecimiento de los procesos de ingeniería inversa y fabricación de prototipos en el contexto académico y formativo de la ingeniería?

## **9. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL**

### **9.1. Enfoque metodológico del proyecto**

El presente proyecto se enmarca dentro de un enfoque metodológico aplicado y experimental orientado a la puesta en práctica y validación de un sistema integrado de digitalización tridimensional e impresión 3D para el desarrollo de procesos de ingeniería inversa y fabricación de prototipos en el entorno académico de la ingeniería.

Desde el punto de vista de la metodología, el trabajo se apoya en la investigación aplicada, pues no se limita a exponer la descripción conceptual de las tecnologías tratadas, sino que pone de manifiesto su integración operativa en la realidad del Laboratorio, con el fin de generar soluciones tecnológicas que permitan afianzar la práctica formativa, el desarrollo de prototipos o la experimentación técnica, pero al mismo tiempo se apoya de un diseño experimental controlado en el que llevan a cabo actividades secuenciales de digitalización, procesamiento geométrico y manufactura aditiva, de forma que se permite la observación directa de los resultados en cada fase del proceso.

La creación metodológica del proyecto se organiza según un ciclo operativo scan-to-CAD-to-print, que organiza, de una forma ordenada, las etapas de la captura geométrica mediante escaneo 3D, la reconstrucción y ajuste del modelo digital en plataforma CAD y la materialización física del componente mediante impresión 3D, permitiendo una correlación entre el diseño digital y el prototipo fabricado, así como la capacidad evaluativa del comportamiento técnico del ciclo en

cuanto a la precisión dimensional, a la funcionalidad del prototipo y a la interés académico del recurso generado.

Del mismo modo, la propuesta de diseño metodológico incluye un componente procedimental y evaluativo que integra la selección de las piezas de prueba, el diseño técnico de los equipos, la realización del proceso experimental y la justificación básica de los resultados que se obtuvieron. Esta estructura metodológica permite garantizar la reproducibilidad del proceso, la trazabilidad de las acciones realizadas y la producción de las evidencias técnicas que demuestran el impacto que la aplicación del sistema tuvo en la ingeniería inversa y el prototipado académico.

En este sentido, la metodología adoptada favorece una combinación equilibrada entre la experimentación tecnológica, la validación práctica y la aplicación formativa, asegurando así que los resultados del proyecto no se queden en una línea descriptiva, sino que ello se materialice en procedimientos donde se apliquen, utilicen y analicen técnicamente el sistema que se ha desarrollado.

## **9.2. Escenario de implementación del proyecto**

El proyecto se implementa en el LABORATORIO DE ELECTROMECAÁNICA DE LA UTC EXTENSIÓN LA MANÁ, espacio académico–tecnológico destinado al desarrollo de actividades de formación práctica, experimentación aplicada y fabricación de prototipos dentro del ámbito de la ingeniería. El laboratorio comentado cuenta con infraestructura física, equipamiento informático y recursos tecnológicos; recursos que permiten la integración operativa del sistema de digitalización tridimensional, modelado CAD y manufactura aditiva que se propone en el presente proyecto.

El laboratorio está concebido para llevar a cabo actividades de aprendizaje aplicado y experimentación técnica (por ejemplo, análisis de conjuntos mecánicos, rediseño de piezas, trabajos de ingeniería inversa o fabricación de prototipos de un diseño funcional). Para tal efecto, dispone de áreas diferenciadas para el proceso de escaneo 3D, el procesamiento digital del modelo y la fabricación mediante impresión aditiva, lo que facilita la organización secuencial del proceso experimental y el control de las condiciones de operación.

Dicho contexto académico se presenta, así como un entorno de experimentación tecnológica con vigilancia en el que entran alumnos y profesores en prácticas de tipo formativo y práctico. La

disposición del medio de trabajo admite la distribución del equipo, la delimitación de zonas operativas y la disposición de superficies para el posicionamiento de piezas, equipos de captura geométrica y sistemas de impresión, permitiendo un orden técnico adecuado y la seguridad en la operación y la estabilidad del proceso.

Durante la ejecución del proyecto, el LABORATORIO DE ELECTROMECAÁNICA DE LA UTC EXTENSIÓN LA MANÁ constituirá el escenario principal del proceso experimental, donde se realizará la digitalización de los objetos seleccionados, el procesamiento de los modelos tridimensionales y la fabricación de los prototipos impresos. En este mismo espacio se efectuará también la documentación técnica del procedimiento, el registro fotográfico de cada etapa y la verificación preliminar del desempeño de las piezas generadas.

### 9.3. Criterios de Selección de Equipos Tecnológicos

La selección de los equipos que conforman el sistema integrado de digitalización e impresión 3D se realizó a través de un proceso de evaluación técnica y económica estructurado, que consideró los requerimientos operativos del laboratorio, las especificaciones técnicas mínimas necesarias para ingeniería inversa a escala académica y las restricciones presupuestarias del proyecto.

#### 9.3.1. Requerimientos técnicos del sistema

Para garantizar la viabilidad del flujo scan-to-CAD-to-print en el contexto académico del laboratorio de Electromecánica, se establecieron los siguientes requerimientos mínimos del sistema:

**Tabla 10.** Requerimientos técnicos establecidos para la selección de equipos del sistema integrado

| Parámetro de requerimiento          | Escáner 3D                                                   | Impresora 3D                                                      |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| <b>Exactitud</b> / <b>Precisión</b> | $\leq 0,05$ mm (para piezas mecánicas de hasta 300 mm)       | $\pm 0,3 - 0,5$ mm (tolerancia FDM estándar para prototipado)     |
| <b>Rango de trabajo</b>             | Piezas de 20 – 300 mm (componentes electromecánicos típicos) | Volumen mínimo $200 \times 200 \times 200$ mm (piezas académicas) |

|                                   |                                                                             |                                                                            |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| <b>Compatibilidad de software</b> | Exportación en STL / OBJ compatible con software CAD                        | Compatible con G-code generado por Creality Print / Cura                   |
| <b>Facilidad de operación</b>     | Interfaz intuitiva adaptada a usuarios sin experiencia previa en escaneo 3D | Sistema de nivelación automática y pantalla táctil para operación autónoma |
| <b>Portabilidad / instalación</b> | Portátil (handheld) o de sobremesa, para uso flexible en el laboratorio     | Estructura compacta adaptable a la estación de trabajo móvil diseñada      |

#### 9.4. Justificación de la selección del Escáner 3D Seal Lite de 3DMakerPro

Se evaluaron tres alternativas de escáneres 3D disponibles en el mercado dentro del rango presupuestario establecido: el Revopoint RANGE 2, el Creality Raptor y el 3DMakerPro Seal Lite. El criterio de selección ponderó los parámetros técnicos frente al costo y la disponibilidad para el contexto académico ecuatoriano.

**Tabla 11.** Comparativa de alternativas de escáneres 3D evaluadas

| <b>Criterio de evaluación</b> | <b>Revopoint RANGE 2</b>     | <b>Creality Raptor</b>       | <b>3DMakerPro Seal Lite</b> |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| <b>Exactitud</b>              | 0,10 mm                      | 0,05 mm                      | 0,02 mm                     |
| <b>Rango de captura</b>       | 50 – 500 mm                  | 30 – 300 mm                  | 10 – 300 mm                 |
| <b>Formato salida</b>         | OBJ, STL                     | STL, OBJ                     | OBJ/STL/PLY/ASC             |
| <b>Precio aproximado</b>      | USD 599                      | USD 449                      | USD 350                     |
| <b>Cumple requerimiento</b>   | Parcial (excede presupuesto) | Parcial (excede presupuesto) | TOTAL                       |

El escáner 3DMakerPro Seal Lite fue seleccionado por presentar la mayor exactitud (0,02 mm) dentro del presupuesto disponible, cumplir con todos los requerimientos técnicos establecidos y ofrecer compatibilidad completa con el software JMStudio, cuya interfaz resulta adecuada para usuarios en formación académica.

##### 9.4.1. Justificación de la selección de la Impresora 3D Ender con cama Mingda

Para la impresora 3D, se evaluaron tres modelos FDM disponibles: la Bambu Lab A1 Mini, la Creality Ender-3 V3 y la impresora Ender con cama de impresión Mingda (300 × 300 × 400 mm).

El criterio de mayor ponderación fue el volumen de impresión, dado que el proyecto requería fabricar prototipos de hasta 180 mm de diámetro (tapacubos), y la relación costo-prestaciones.

La impresora Ender con cama Mingda fue seleccionada porque ofrece el mayor volumen de construcción dentro del presupuesto asignado ( $300 \times 300 \times 400$  mm frente a los  $180 \times 180 \times 180$  mm de alternativas más económicas), permitiendo la fabricación de todos los prototipos del proyecto sin necesidad de división de piezas, con un costo de USD 420,00 que se ajusta al presupuesto establecido.

#### 9.4.2. Análisis de incertidumbre del proceso scan-to-CAD-to-print

La incertidumbre dimensional total del sistema integrado resulta de la propagación de errores individuales de cada etapa del proceso. Asumiendo distribuciones de error independientes, la incertidumbre combinada se estima mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{total} = \sqrt{(\varepsilon_{escáner}^2 + \varepsilon_{CAD}^2 + \varepsilon_{FDM}^2)}$$

Donde:

$\varepsilon_{escáner}$  = exactitud del escáner Seal Lite = 0,02 mm (dato del fabricante [5])

$\varepsilon_{CAD}$  = error de reconstrucción geométrica en software CAD  $\approx 0,01$  mm (resolución del kernel geométrico)

$\varepsilon_{FDM}$  = tolerancia dimensional del proceso FDM = 0,30 – 0,50 mm (valor estándar para altura de capa 0,2 mm [23])

$$\varepsilon_{total} = \sqrt{(0,02^2 + 0,01^2 + 0,40^2)} \approx \sqrt{(0,0004 + 0,0001 + 0,1600)} \approx 0,40 \text{ mm}$$

Este resultado indica que la incertidumbre total del sistema es de aproximadamente 0,40 mm, dominada por la variabilidad del proceso de impresión FDM. Las desviaciones experimentales obtenidas en este proyecto (media = 0,36 mm) son consistentes con este valor teórico, validando la correcta integración del sistema.

### 10. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El proceso de implementación del sistema integrado de digitalización e impresión 3D en el laboratorio de Electromecánica de la UTC Extensión La Maná se desarrolló siguiendo el flujo de trabajo scan-to-CAD-to-print. Para validar el funcionamiento del sistema, se ejecutaron pruebas

de digitalización y fabricación con diferentes piezas electromecánicas, cuyos resultados se presentan a continuación.

### **10.1. Proceso de digitalización tridimensional**

El escaneo se llevó a cabo usando el escáner 3D Seal Lite de 3DMakerPro y los parámetros óptimos configurados en el software JMStudio. Para la prueba de digitalización se seleccionaron las siguientes piezas: un tapacubos de vehículo, un engranaje de transmisión, un rotor dentado y piezas cilíndricas de varias dimensiones. Cada pieza se ubicaba sobre la mesa giratoria para garantizar el escaneo completo de la geometría de la superficie.

La configuración técnica usada en el escaneo fue la siguiente: distancia de trabajo de 200 mm, velocidad de captura de 10 fps, modo de seguimiento visual activado y resolución de malla estándar. Las superficies reflectantes fueron tratadas anteriormente con spray mate para obtener un mejor resultado de captura. La duración media de digitalización por pieza fue de entre 3 a 5 minutos, dependiendo de la complejidad geométrica del objeto.

Las nubes de puntos generadas se procesaron mediante las herramientas de depuración del software JMStudio, eliminando puntos erróneos, uniendo escaneos parciales y obteniendo mallas trianguladas optimizadas. Los modelos digitales se exportaron en formato STL para su posterior tratamiento en el software de laminado de la impresora.

### **10.2. Proceso de fabricación mediante impresión 3D**

Los prototipos fueron manufacturados en la impresora 3D Ender en cama de impresión Mingda de  $300 \times 300 \times 400$  mm, bajo tecnología de fabricación aditiva FDM (Modelado por Deposición Fundida), utilizando filamento PLA de color rojo con un diámetro de 1,75 mm, elegido por su facilidad de impresión, estabilidad dimensional y calidad superficial adecuada para aplicaciones de validación geométrica.

Los parámetros de impresión definidos fueron: altura de capa 0,2 mm, velocidad de impresión 50 mm/s, temperatura de extrusión 200 °C, temperatura de cama 60 °C, densidad de relleno del 20% con patrón giroide. Dichos parámetros se fijaron de manera de poder conseguir el mejor equilibrio entre el tiempo de fabricación, la resistencia de la pieza y la calidad superficial del prototipo.

### 10.3. Prototipos fabricados y resultados obtenidos

Cinco prototipos diferentes fueron obtenidos para validar el funcionamiento del sistema integrado, cada uno de los cuales representa distintos niveles de complejidad en la geometría, así como aplicaciones típicas del ámbito electromecánico.

#### 10.3.1. Prototipo 1: Tapacubos de vehículo

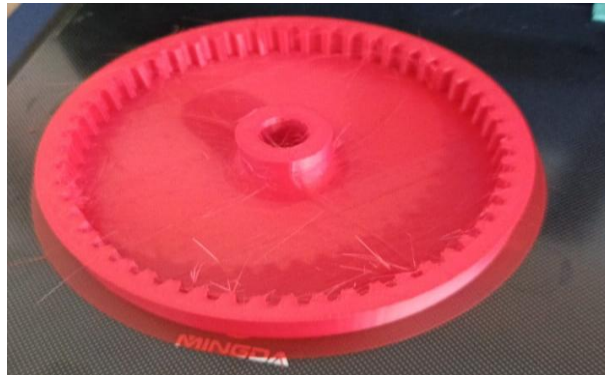
El tapacubos corresponde a una pieza de geometría compleja ya que tiene múltiples radios, cavidades y detalles superficiales. El escaneo se mostró como una herramienta que pudo captar satisfactoriamente toda la geometría de la pieza, incluyendo los elementos decorativos y las zonas de acoplamiento. La impresión se realizó en posición horizontal con el propósito de minimizar los soportes, por lo que el tiempo total de la fabricación se estimó en aproximadamente ocho horas.



**Figura 14.** Prototipo de tapacubos fabricado mediante impresión 3D FDM

#### 10.3.2. Prototipo 2: Rotor dentado

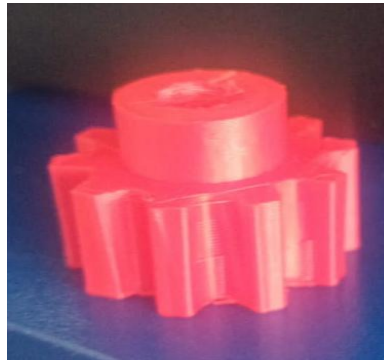
El rotor dentado es una representación típica de sistemas de transmisión y máquinas rotativas, constituido por dentado interno perimetral y cubo central con alojamiento para eje. La digitalización logró captar con precisión el perfil de los dientes y las dimensiones del alojamiento central. El prototipo fue impreso en posición horizontal directamente sobre la cama de impresión y sacando partido al volumen de construcción.



**Figura 15.** Prototipo de rotor dentado recién fabricado sobre la cama de impresión Mingda

### **10.3.3. Prototipo 3: Engranaje de transmisión**

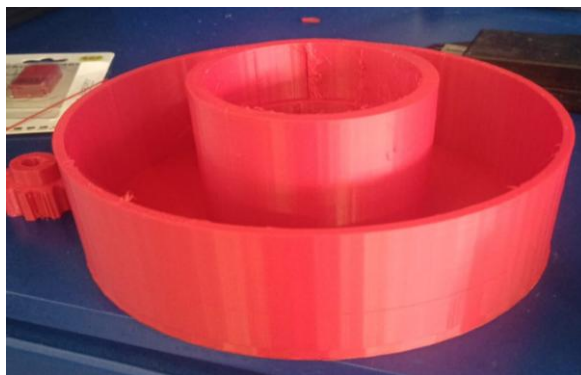
El engranaje de transmisión es un componente mecánico de precisión con dentado exterior y cubo central. La pieza digitalizada se presentó con un perfil de diente definido y el prototipo logró reproducir fielmente el perfil de diente digitalizado. Las dimensiones del engranaje permitieron establecer un tiempo de fabricación de aproximadamente 2 horas, con buen perfil de dientes y con un acabado superficial equilibrado.



**Figura 16.** Prototipo de engranaje de transmisión fabricado en PLA

### **10.3.4. Prototipo 4: Componente cilíndrico concéntrico**

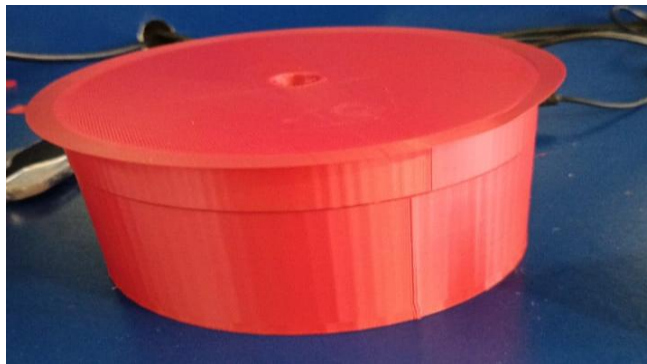
Este prototipo es un componente con geometría cilíndrica concéntrica, típico para carcasas, acoplamientos o alojamientos para rodamientos. La pieza presenta dos cilindros de diferentes diámetros en la misma estructura. El proceso de escaneo capturó perfectamente las dimensiones de ambos cilindros y la impresión generó una geometría fiel al original y con la concentricidad que se pretendía entre los elementos.



**Figura 17.** Prototipo de componente cilíndrico concéntrico.

#### **10.3.5. Prototipo 5: Contenedor cilíndrico con tapa**

El contenedor cilíndrico con tapa representa un ensamble de dos piezas que requiere correspondencia dimensional para su correcto acople. Tanto el cuerpo del contenedor como la tapa fueron digitalizados y fabricados de manera independiente, validando posteriormente su ajuste mecánico. El resultado demostró la capacidad del sistema para producir piezas con tolerancias funcionales que permiten el ensamblaje correcto de componentes.



**Figura 18.** Prototipo de contenedor cilíndrico con tapa ensamblada

#### **10.4. Análisis dimensional comparativo**

Para evaluar la precisión del sistema implementado, se realizó un análisis dimensional comparativo entre las piezas originales, los modelos digitales obtenidos del escaneo y los prototipos fabricados mediante impresión 3D. Las mediciones se efectuaron utilizando calibrador vernier con resolución de 0,05 mm, registrando las dimensiones principales de cada componente.

**Tabla 10.** Análisis dimensional comparativo de los prototipos fabricados

| <b>Prototipo</b>      | <b>Dimensión evaluada</b> | <b>Pieza original (mm)</b> | <b>Modelo escaneado STL (mm)</b> | <b>Prototipo impreso (mm)</b> | <b>Desv. scan–orig. (mm)</b> | <b>Desv. impreso–orig. (mm)</b> |
|-----------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Tapacubos             | Diámetro exterior         | 165,0                      | 165,1                            | 164,6                         | +0,1                         | –0,4                            |
| Rotor dentado         | Diámetro exterior         | 180,0                      | 179,9                            | 179,5                         | –0,1                         | –0,5                            |
| Rotor dentado         | Diámetro interior         | 25,0                       | 25,0                             | 25,3                          | 0,0                          | +0,3                            |
| Engranaje             | Diámetro primitivo        | 45,0                       | 45,1                             | 44,7                          | +0,1                         | –0,3                            |
| Engranaje             | Altura total              | 30,0                       | 29,9                             | 29,8                          | –0,1                         | –0,2                            |
| Contenedor cilíndrico | Diámetro mayor            | 120,0                      | 120,0                            | 119,6                         | 0,0                          | –0,4                            |
| Contenedor cilíndrico | Diámetro menor            | 60,0                       | 60,1                             | 59,7                          | +0,1                         | –0,3                            |
| Contenedor con tapa   | Diámetro exterior         | 140,0                      | 140,1                            | 139,5                         | +0,1                         | –0,5                            |

El análisis comparativo de la cadena completa demuestra que la etapa de escaneo introduce desviaciones de apenas 0,0 a 0,1 mm respecto a la pieza original, confirmando que el escáner Seal Lite opera dentro de su exactitud nominal de 0,02 mm con un margen atribuible a la resolución del calibrador de verificación (0,05 mm). Las desviaciones de la etapa de impresión FDM, de entre 0,2 y 0,5 mm, son las dominantes en la incertidumbre total del sistema, lo que es congruente con el análisis teórico de propagación de errores presentado en la sección de metodología.

### **10.5. Validación del flujo de trabajo scan–to–CAD–to–print**

El ciclo completo de trabajo scan–to–CAD–to–print fue validado satisfactoriamente mediante la ejecución sistemática de las etapas de digitalización, procesamiento y fabricación de los cinco prototipos descritos. El flujo de trabajo demostró ser funcional y replicable, permitiendo la obtención de prototipos con correspondencia geométrica respecto a las piezas originales.

**Tabla 11.** Tiempos de ejecución del proceso scan-to-CAD-to-print

| <b>Prototipo</b>         | <b>Escaneo<br/>(min)</b> | <b>Procesamiento<br/>nube de puntos<br/>(min)</b> | <b>Modelado<br/>CAD (min)</b> | <b>Laminado /<br/>Slicer (min)</b> | <b>Impresión<br/>3D (h)</b> | <b>Tiempo<br/>total</b> |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Tapacubos                | 5                        | 15                                                | 25                            | 8                                  | 8,0 h                       | 8 h 53<br>min           |
| Rotor dentado            | 4                        | 10                                                | 20                            | 7                                  | 6,0 h                       | 6 h 41<br>min           |
| Engranaje                | 3                        | 8                                                 | 15                            | 5                                  | 2,0 h                       | 2 h 31<br>min           |
| Contenedor<br>cilíndrico | 3                        | 10                                                | 18                            | 6                                  | 4,0 h                       | 4 h 37<br>min           |
| Contenedor<br>con tapa   | 4                        | 12                                                | 22                            | 7                                  | 5,0 h                       | 5 h 45<br>min           |
| PROMEDIO /<br>TOTAL      | 3,8                      | 11,0                                              | 20,0                          | 6,6                                | 5,0 h                       | 5 h 41<br>min           |

El análisis de los tiempos de ejecución evidencia que la etapa de impresión 3D representa la fase de mayor duración del proceso, ocupando aproximadamente el 87% del tiempo total en promedio. Las etapas digitales (escaneo, procesamiento y modelado CAD) se completan en un tiempo conjunto de 30 a 52 minutos, lo que demuestra la agilidad del flujo de trabajo digital en comparación con los tiempos de fabricación. El modelado CAD es la etapa digital más demandante en tiempo, con una media de 20 minutos, debido a la reconstrucción paramétrica de las superficies escaneadas.

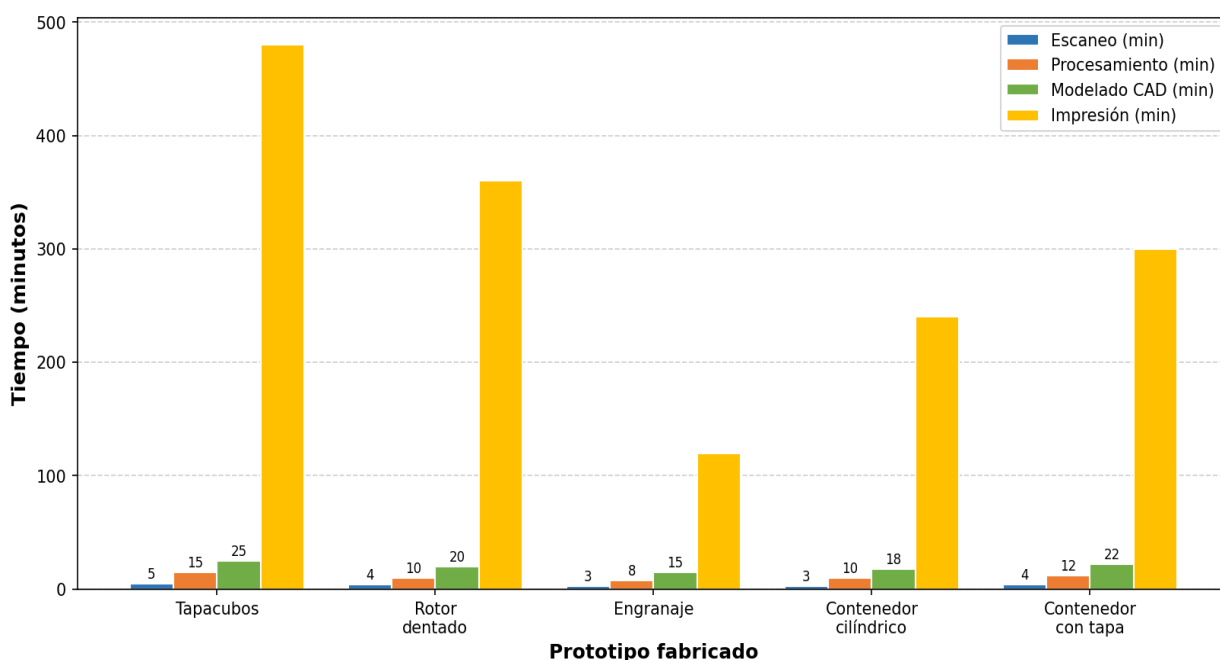
Los tiempos de ejecución obtenidos indican que la totalidad del proceso de ingeniería inversa y fabricación de un prototipo puede cumplirse en un tiempo comprendido entre las 2 y las 8 horas aproximadamente, dependiendo del grado de complejidad y del tamaño de la pieza. Estos tiempos son compatibles con la planificación de las prácticas de aula y experimentales de una asignatura en el horario del laboratorio.

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema de digitalización e impresión 3D que se ha desarrollado en el laboratorio de Electromecánica cumple satisfactoriamente lo que se había definido como objetivo. La capacidad del escáner Seal Lite para adecuar geometrías complejas con

una precisión de 0,02 mm, junto con la versatilidad de la impresora Ender para fabricar piezas de las dimensiones y morfologías más variadas, constituye un sistema operativo para el desarrollo de la ingeniería inversa y del prototipado en el ámbito académico.

Las desviaciones dimensionales registradas, con una media de 0,36 mm, se encuentran naturalmente justificada por las condiciones propias del proceso de impresión FDM, tales como la contracción del material cuando se enfría, tolerancias mecánicas del nodo de impresión y configuración de los parámetros de fabricación, lo que no impide que se puedan utilizar los prototipos para validación geométrica, análisis de ensamblaje y experimentación docente, ya que las adecuaciones producidas, no influyen en la funcionalidad la de prototipos para la validación geométrica, análisis de ensamblado y experimentación docente, ya que las desviaciones registradas aunque existentes no comprometen el uso de esos prototipos.

La implementación del flujo scan-to-CAD-to-print demuestra la viabilidad técnica del sistema para ponerlo en práctica dentro de los ámbitos de la práctica de la formación, proyectos de titulación, investigación aplicada y vinculación con el entorno productivo; el Laboratorio de Electromecánica dispone de la tecnología necesaria para la ingeniería inversa, reproducción de piezas discontinuadas, diseño de prototipos funcionales y validación experimental de componentes electromecánicos.



**Figura 19.** Comparativa de tiempos de ejecución por etapa del proceso scan-to-CAD-to-print

La Figura 10 muestra la distribución del tiempo de ejecución por prototipo y por etapa del ciclo scan-to-CAD-to-print. Se observa que la etapa de impresión 3D domina significativamente el tiempo total del proceso para todos los prototipos, especialmente en el caso del tapacubos (480 min), que presenta la geometría más compleja. Las etapas digitales escaneo, procesamiento y modelado CAD se mantienen en rangos de tiempo reducidos (3 a 25 min), evidenciando la eficiencia del flujo de trabajo digital implementado. El engranaje resulta ser el prototipo con menor tiempo total de fabricación, lo que lo convierte en la pieza más adecuada para prácticas académicas de introducción al sistema en el horario de laboratorio.

## **11. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONÓMICOS)**

La implementación del sistema integrado de digitalización tridimensional e impresión 3D genera una serie de impactos positivos en los ámbitos técnico, académico, social, ambiental y económico, derivados de la incorporación de tecnologías de ingeniería inversa, prototipado funcional y manufactura aditiva en el entorno formativo de la ingeniería.

### **11.1. Impacto técnico**

El impacto técnico del proyecto está asociado al desarrollo de competencias de análisis geométrico, reinención y validación de componentes al unificar en el mismo flujo de trabajo los procesos de escaneo 3D, modelado CAD y fabricación de prototipos. La existencia de un sistema de prototipado operativo facilita la precisión en la copia de piezas, permite abordar la evaluación dimensional y proporciona la posibilidad de llevar a cabo prácticas experimentales referidas a la ingeniería inversa y a la optimización de geometrías.

También, el proyecto favorece el uso de herramientas tecnológicas actuales relacionadas con la manufactura digital, lo que va en consonancia con el desarrollo de competencias técnicas vinculadas a los requerimientos de las profesiones actuales de la industria. Así el laboratorio consolida un entorno de experimentación vinculada y una verificación técnica de los resultados lo que le permite incrementar su potencial operativo y su capacidad académica en actividades de diseño y fabricación.

### **11.2. Impacto social**

Desde lo social, el proyecto permite afianzar el proceso de enseñanza-aprendizaje mediante un modelo de aprendizaje que favorece activamente la práctica, la experimentación y la resolución de

problemas reales. La participación de estudiantes y docentes en actividades de digitalización, rediseño y prototipado favorece el fortalecimiento de habilidades colaborativas, pensamiento crítico y creatividad tecnológica.

Además, mediante el sistema de ingeniería inversa y manufactura aditiva se da solución a proyectos académicos que pueden desarrollarse en función de necesidades del entorno: a partir de la elaboración de adaptadores, soportes, piezas de uso académico, prototipos funcionales o propuestas de rediseño técnico que pueden ser aplicadas en los ámbitos institucionales, comunitarios o productivos. Esto permite reafirmar la articulación entre la universidad y la sociedad frente a la entrega de soluciones tecnológicas accesibles.

### **11.3. Impacto ambiental**

En el aspecto ambiental, el sistema fomenta el uso de prototipo local y a pequeña escala, disminuyendo de esta manera la fabricación externa o la importación de componentes con fines académicos. La capacidad de imprimir modelos de ensayo y ajustes previos reduce el desecho de material que conllevan procesos mecanizados o de fabricación en serie.

Por otro lado, el uso de materiales poliméricos de impresión cuya recuperación es parcial o de bajo coste de reutilización ayuda a sacar un mejor rendimiento de los recursos involucrados en el proceso del experimento. De la misma forma, la filosofía de prototipo y rediseño optimizado también incita a establecer una cultura de consumo optimizado, ya que solo se fabricarán piezas que sean necesarias para la validación técnica.

### **11.4. Impacto económico**

La resonancia económica del proyecto se evidenciará en el hecho que, al permitir que prototipos y piezas de ensayo sean fabricados de forma directa dentro del laboratorio mediante la técnica de impresión 3D, se produce una reducción de los costos que venía asociada a esta actividad, tales como los que implican acudir al suministro externo, el transporte y la contratación de servicios de fabricación.

Por otra parte, la puesta en práctica del sistema permite consolidar las capacidades institucionales para el desarrollo de proyectos técnicos, trabajos de investigación aplicada, actividades de innovación, lo que suponga un valor añadido en términos de competitividad académica y de previsión tecnológica. A medio plazo, la utilización del sistema conduce al ahorro en los costes

operativos y a la optimización de los recursos vinculados a prácticas experimentales y actividades de laboratorio.

Sumándolo todo, los impactos generados por el proyecto acreditan su relevancia técnica-formativa y académica, al incluir tecnologías emergentes, reforzando de esta forma los procesos de aprendizaje, fomentando la experimentación aplicada y, a la vez, favoreciendo el desarrollo de sostenibilidad de las actividades de ingeniería en el espacio universitario.

## 12. PRESUPUESTO PARA LA PROPUESTA DEL PROYECTO:

En la tabla que se muestra a continuación, se describe los materiales y elementos usados para el desarrollo del presente proyecto.

**Tabla 12.** Presupuesto

| <b>Cantidad</b> | <b>Detalle</b>                                    | <b>P. Unitario</b> | <b>P. Total</b> |
|-----------------|---------------------------------------------------|--------------------|-----------------|
| 1               | Escáner 3D Seal Lite 3DMakerPro                   | 350.00             | 350.00          |
| 1               | Impresora 3D Ender con cama Mingda 300x300x400mm  | 420.00             | 420.00          |
| 1               | Mesa giratoria para escaneo                       | 45.00              | 45.00           |
| 1               | Sistema de iluminación LED auxiliar               | 35.00              | 35.00           |
| 1               | Mesa móvil metálica con cajones y panel posterior | 280.00             | 280.00          |
| 1               | Pintura y acabados de estación de trabajo         | 85.00              | 85.00           |
| 4               | Ruedas industriales con freno                     | 10.00              | 40.00           |
| 1               | Monitor LG para visualización                     | 180.00             | 180.00          |
| 5               | Filamento PLA 1kg                                 | 15.00              | 75.00           |
| 2               | Spray mate para superficies reflectivas           | 7.50               | 15.00           |
| 1               | Kit de herramientas y accesorios de mantenimiento | 45.00              | 45.00           |
|                 | Transporte y logística                            | 60.00              | 60.00           |
|                 | Impresiones y documentación técnica               | 50.00              | 50.00           |
|                 | Imprevistos (5%)                                  | 85.00              | 85.00           |
|                 | <b>TOTAL</b>                                      |                    | <b>1,765.00</b> |

## 13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 13.1. Conclusiones

El presente proyecto de investigación logró implementar exitosamente un sistema integrado de digitalización tridimensional e impresión 3D en el laboratorio de Electromecánica de la

Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná. A partir de los resultados obtenidos, se establecen las siguientes conclusiones:

Se diseñó y documentó el flujo de trabajo técnico del ciclo scan-to-CAD-to-print como un procedimiento metodológico de seis etapas estructuradas: adquisición geométrica, procesamiento de nube de puntos, reconstrucción CAD paramétrica, laminado, fabricación aditiva y validación dimensional. Este flujo fue considerado en un diagrama de proceso y contrastado en la práctica mediante la fabricación de cinco prototipos experimentales, lo que verificó su replicabilidad y validez como guía operativa para prácticas académicas de laboratorio. La elección del escáner 3D Seal Lite de 3DMakerPro y de la impresora 3D FDM Ender con cama Mingda se realizó mediante un procedimiento de evaluación técnica comparativa de tres alternativas por equipo, ponderando criterios, tales como exactitud, rango de captura, compatibilidad de software, facilidad de operación y presupuesto disponible. En este sentido, se eligió el escáner Seal Lite por presentar la mayor exactitud del mercado para el rango de precio establecido (obteniéndose 0,02 mm de exactitud y 0,07 mm de resolución, frente a 0,05–0,10 mm de las alternativas) y se eligió la impresora Ender con cama Mingda por presentar el mayor volumen de construcción (300 × 300 × 400 mm ocupando completamente para la fabricación de todos los prototipos objeto del proyecto sin restricciones en el tamaño), finalmente configurar e integrar ambos equipos en la estación de trabajo móvil diseñada exprofeso fue un éxito garantizando la operabilidad y la compatibilidad técnica comprobada.

Se desarrollaron y validaron cinco prototipos experimentales correspondientes a piezas electromecánicas de geometría variada: tapacubos, rotor dentado, engranajes de transmisión, componente cilíndrico concéntrico y contenedor con tapa. El análisis dimensional comparativo de la cadena integral (pieza original→modelo escaneado→prototipo impreso) mostró que la etapa de escaneado daba desviaciones mínimas de comercio de 0,0–0,1 mm en comparación a la pieza original (dentro de la exactitud nominal del equipo), mientras que, el proceso de impresión FDM proporcionaba desviaciones de entre 0,2 y 0,5 mm, siendo 0,36 mm el valor medio. Este rango de valores se situaba dentro de los límites considerados aceptables para aplicaciones de validación geométrica y por el prototipado funcional académico (tolerancia FDM estándar:  $\pm 0,3$ –0,5 mm). Los tiempos totales de fabricación varían entre 2 h 31 min (engranaje) y 8 h 53 min (tapacubos), resultando ser compatibles con la planificación de prácticas académicas.

La implementación del sistema integrado mejora de forma cuantificable las capacidades del laboratorio de Electromecánica, al sumar tecnologías de ingeniería inversa, digitalización 3D y manufactura aditiva que hasta ahora no estaban disponibles para el alumnado de la carrera. El sistema contribuye al desarrollo de competencias profesionales alineadas con los requerimientos de la Industria 4.0 y genera las condiciones técnicas necesarias para el desarrollo de proyectos de investigación aplicada, trabajos de titulación y actividades de vinculación con el entorno productivo.

### **13.2. Recomendaciones**

Se recomienda ejecutar el Programa de Mantenimiento Preventivo del Sistema detallado en la Tabla 13 de este documento, que establece actividades de mantenimiento para el escáner 3D, la impresora 3D y la estación de trabajo. Este programa, registrado en la bitácora de laboratorio, permitirá prolongar la vida útil de los equipos, mantener la precisión operativa del escáner y reducir las interrupciones por fallo técnico durante las actividades académicas.

Es conveniente poner en práctica un programa de mantenimiento preventivo del equipo que contemple calibraciones periódicas del escáner, limpieza técnica de la impresora 3D, comprobaciones de piezas claves y un registro de incidencias, con la finalidad de promover la continuidad en el funcionamiento del sistema y su longevidad.

Se sugeriría ampliar la disponibilidad de materiales de impresión, incorporando filamentos técnicos como el PETG, el ABS o compuestos reforzados que hagan posible la fabricación de prototipos con requerimientos mecánicos y térmicos más exigentes para su validación funcional en el ámbito electromecánico.

## **14. BIBLIOGRAFÍA**

- [1] M. Rešetar, F. Valjak, M. Grabar, M. Šercer, y N. Bojčetić, “An approach for reverse engineering and redesign of additive manufactured spare parts,” Proc. Design Society, vol. 4, p. 703, 2024, doi: 10.1017/pds.2024.73.
- [2] M. M. Ribó, Vat Photopolymerization Process Chain. Research Portal Denmark, 2020. Disponible en: <https://local.forskningsportal.dk/...>

- [3] C. C. Rivera, J. N. Rodríguez, y Á. Ortiz, "Research on the Input-Transformation-Output Process of Additive Manufacturing," *Crystals*, vol. 14, no. 1, p. 7, 2023, doi: 10.3390/cryst14010007.
- [4] G. S. Robles et al., "Significance of Fundamental Metrology of 3D-Printed Parts for Engineering Design," *ASSET*, vol. 4, no. 2, 2022, doi: 10.26877/asset.v4i2.12950.
- [5] İ. B. Şahin et al., "Metal Particle Reinforced PLA Biocomposites via Additive Manufacturing," *Arab. J. Sci. Eng.*, 2025, doi: 10.1007/s13369-025-10555-6.
- [6] S. I. Scipioni y F. Lambiase, "Error introduced by direct 3D printing...", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 129, p. 4355, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-12625-1.
- [7] J. Sedlák et al., "Reverse engineering method used for inspection...", *MM Science Journal*, 2017, doi: 10.17973/mmsj.2017\_11\_201719.
- [8] V. Šenkeřík et al., "Analysis of Extrusion Process Parameters in PLA Filament," *Manufacturing Technology*, vol. 24, no. 2, p. 265, 2024, doi: 10.21062/mft.2024.037.
- [9] G. A. Shah, "Template-based reverse engineering of parametric CAD models from point clouds," *HAL Thesis*, 2021. Disponible en: <https://pastel.hal.science/tel-03678363>
- [10] D. R. T. Velázquez et al., "Implicações das tecnologias híbridadas...", *Exacta*, vol. 18, no. 4, p. 778, 2020, doi: 10.5585/exactaep.v18n4.13270.
- [11] H. Villarraga-Gómez et al., "Non-destructive characterization...", *E-Journal of NDT*, vol. 29, no. 3, 2024, doi: 10.58286/29259.
- [12] Y. Wakjira et al., "Accuracy of 3D printed medical models through reverse engineering," *Heliyon*, vol. 10, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31829.
- [13] L. Wang et al., "Deep Dynamic Layout Optimization...", *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 21, no. 4, pp. 6176–6189, 2023, doi: 10.1109/TASE.2023.3323088.
- [14] G. Wersényi et al., "Cost-effective 3D scanning and printing technologies...", *Head & Face Medicine*, vol. 19, 2023, doi: 10.1186/s13005-023-00394-x.
- [15] L. A. B. Wilson y L. Humphrey, "Voyaging into the third dimension...", *Forensic Sci. Int.*, vol. 278, p. 32, 2017, doi: 10.1016/j.forsciint.2017.06.016.

- [16] M. Wygoda y T. Witko, "Effective management of key variables in the 3D printing process...", Sci. Pap. Silesian Univ. Technol., no. 197, p. 641, 2024, doi: 10.29119/1641-3466.2024.197.35.
- [17] D. E. Yunus et al., "Acoustic patterning for 3D embedded conductive wire in stereolithography," J. Micromech. Microeng., vol. 27, no. 4, 2017, doi: 10.1088/1361-6439/aa62b7.
- [18] M. G. Guerra et al., "Use of Miniature Step Gauges to Assess 3D Optical Scanners," Sensors, vol. 20, no. 3, p. 738, 2020, doi: 10.3390/s20030738.
- [19] J. Go y A. J. Hart, "A framework for teaching the fundamentals of additive manufacturing," Addit. Manuf., vol. 10, p. 76, 2016, doi: 10.1016/j.addma.2016.03.001.
- [20] D. Godec et al., A Guide to Additive Manufacturing. Springer, 2022, doi: 10.1007/978-3-031-05863-9.
- [21] J. M. González-Varona, Retos para la transformación digital de las PYMES, 2021, doi: 10.35376/10324/47767.
- [22] F. Górski et al., "Mechanical properties of parts of medical products...", Adv. Sci. Technol. Res. J., vol. 11, no. 2, p. 166, 2017, doi: 10.12913/22998624/70997.
- [23] J. Grubbs, B. C. Sousa y D. L. Cote, "Framework for FFF Process Optimization with PLA," Polymers, vol. 15, no. 8, 1945, 2023, doi: 10.3390/polym15081945.
- [24] A. E. Hage et al., "Navigating the digital chain in concrete 3D printing," arXiv preprint, 2024, doi: 10.24355/dbbs.084-202408130938-0.
- [25] W. Harmatys et al., "Influence of IPA rinsing times on surface roughness of SLA-printed parts," Materials, vol. 18, no. 9, 2082, 2025, doi: 10.3390/ma18092082.
- [26] E. Hozdić, "Comparative Analysis of Mechanical Parameters of FDM- and SLA-Printed ABS," Appl. Sci., vol. 14, no. 2, 649, 2024, doi: 10.3390/app14020649.
- [27] A. Husna et al., "Recent advancements in stereolithography and optimization...", Hybrid Advances, vol. 7, 100307, 2024, doi: 10.1016/j.hybadv.2024.100307.

[28] M. Montalti et al., “Geometry verification and reverse engineering using low-cost scanners,” 2024. (Fuente del documento del proyecto).

[29] R. Pollák et al., “Dimensional deviation analysis in FDM printed parts using optical scanning,” 2024. (Fuente del documento del proyecto).