



DOI: <https://doi.org/10.70208/3007.8245.v6.n1.327>

Desarrollo de un módulo educativo para cursos de electricidad mediante fabricación aditiva

Brian Manuel González-Contreras

brianmanuel.gonzalez@uatx.mx

<https://orcid.org/0000-0003-1556-8435>

Universidad Autónoma de Tlaxcala

México

Braulio González-Esquivel

a01425274@tec.mx

<https://orcid.org/0009-0000-8070-3475>

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

México

José Michael Cruz-García

josemichael.cruz.g@uatx.mx

<https://orcid.org/0000-0003-0372-3987>

Universidad Autónoma de Tlaxcala

México

Corina Esquivel-Camacho

corina.esquivel@uatx.mx

<https://orcid.org/0009-0008-4863-6995>

Universidad Autónoma de Tlaxcala

México

RESUMEN

En este trabajo se expone el desarrollo y fabricación de un módulo educativo destinado a facilitar la instrucción mediante experimentos prácticos en el campo de los circuitos eléctricos, empleando técnicas de impresión 3D basadas en la Fabricación por Filamento Fundido. El diseño se basa en un modelo comercial desactualizado, con el propósito de ofrecer opciones de sustitución para el equipamiento en el laboratorio de ingeniería mecánica, específicamente en el sector eléctrico. Se detalla el proceso de diseño aplicando principios de ingeniería mecánica y enfocándose en el prototipado acelerado. El módulo fue modelado en AutoCAD 2025 en su versión para estudiantes, preparado para impresión en Creality Print y producido con una impresora ENDER-3 V3 SE utilizando filamento de ácido poliláctico. Se incluyen las características definitivas del módulo creado, junto con los parámetros de impresión que facilitaron la obtención de un dispositivo operativo.

Palabras clave: circuitos eléctricos, diseño, fabricación aditiva, impresión 3D, módulo educativo



Development of an educational module for electrical engineering courses using additive manufacturing

ABSTRACT

This paper presents the development and manufacture of an educational module designed to facilitate instruction through practical experiments in the field of electrical circuits, using 3D printing techniques based on Fused Filament Fabrication. The design is based on an outdated commercial model, with the aim of offering replacement options for equipment in mechanical engineering laboratories, specifically in the electrical sector. The design process is detailed, applying mechanical engineering principles and focusing on accelerated prototyping. The module was modeled in AutoCAD 2025 in its student version, prepared for printing in Creality Print, and produced with an ENDER-3 V3 SE printer using polylactic acid filament. The final characteristics of the module created are included, along with the printing parameters that facilitated the production of a working device.

Keywords: additive manufacturing, design, educational module, electrical circuits, 3D printing



INTRODUCCIÓN

La Industria 4.0 representa un tema de importancia creciente en la actualidad, y debe captar mayor atención por parte de los ingenieros mecánicos, ya que simboliza la cuarta revolución industrial (Rana y Rathore, 2023). Esta progresión a lo largo de los años se ilustra en la Figura 1 que, sin entrar en detalles, muestra la evolución y características de cada revolución industrial.

Figura 1. Ilustrativo de la progresión de las revoluciones industriales



Esta última revolución industrial se distingue por la fusión de tecnologías de punta en los procesos productivos y de manufactura, uniendo sistemas físicos con digitales para lograr automatización impulsada por datos. El concepto de Industria 4.0 (I4.0) fue acuñado por el gobierno alemán en la Feria de Hannover de 2011. Se conceptualiza como la integración tanto vertical como horizontal de recursos físicos en un entorno digital (Rana y Rathore, 2023). Enfatiza la automatización sofisticada, la robótica y la mayor interconexión entre equipos (espacios ciberfísicos) y operadores humanos, incorporando análisis de datos, aprendizaje máquina, inteligencia artificial, simulaciones virtuales y sensores avanzados. Constituye un enfoque holístico que aprovecha la digitalización y los sistemas ciberfísicos para optimizar la toma de decisiones y el desempeño operativo (Gibson et al., 2015; Rana y Rathore, 2023). La I4.0 se sustenta en nueve pilares tecnológicos que impulsan la automatización y la transformación digital en la industria (Rana y Rathore, 2023):



- Internet de las cosas y de los servicios. Interconexión de maquinaria, aparatos y sistemas para capturar y distribuir datos en tiempo real, potenciando eficiencia y planificación estratégica.
- Big Data y análisis asociado. Explotación de volúmenes masivos de datos en tiempo real para refinar operaciones, anticipar averías y adaptar productos a necesidades específicas.
- Inteligencia Artificial (IA) y aprendizaje máquina. Aplicación de algoritmos que permiten a los sistemas aprender y evolucionar, automatizando tareas intrincadas.
- Robótica autónoma. Empleo de robots independientes y colaborativos (cobots) que operan junto a humanos para ejecutar labores con exactitud y seguridad.
- Fabricación aditiva (impresión 3D). Producción eficiente de prototipos y artículos personalizados, minimizando gastos y plazos.
- Ciberseguridad. Salvaguarda de redes interconectadas contra riesgos digitales para preservar la confidencialidad de datos y procesos.
- Realidad Aumentada. Implementación de herramientas visuales para potenciar la formación, el monitoreo de operaciones y el mantenimiento de maquinaria.
- Computación en la nube y *edge computing*. Administración y procesamiento de datos a través de plataformas remotas y locales para respuestas ágiles.
- Gemelos digitales y tecnologías de simulación avanzadas. Dispositivos digitales que permiten la emulación de un sistema físico en un sistema virtual en lazo cerrado.

Considerando estos elementos, la impresión 3D adquiere relevancia contemporánea no solo para refinar diseños y materializarlos en aplicaciones prácticas, sino también para actualizar y mejorar recursos educativos. Ante la obsolescencia del equipamiento para prácticas eléctricas en el laboratorio, se propone un rediseño del "módulo eléctrico educativo" integrando tecnologías modernas como la impresión 3D.

Existen varios estudios que han considerado el uso de la tecnología de impresión 3D para educación en ingeniería, tales como los de To et al. (2023) y To et al. (2025), quienes solo analizan, a través de entrevistas semiestructuradas, la forma en que la impresión 3D puede influir en el aprendizaje de áreas



de la ingeniería y la falta de infraestructura para llevarlo a cabo. Mientras que Chen et al. (2023) realizan una propuesta de módulos didácticos lúdicos para estudiantes de primaria por medio de circuitos simples solo para verificar conexiones en serie y en paralelo. Similarmente, pero para estudiantes de secundaria, el trabajo de Tseng y Kawahara (2021) presentan módulos lúdico-didácticos. Un trabajo interesante es el de Vukašinović et al. (2024), quienes emplean la impresión 3D en el proceso de enseñanza en el campo de los componentes hidráulicos y neumáticos mediante el uso de la metodología desarrollada para ayudar a los estudiantes a comprender fácilmente los principios de diseño y funcionamiento de esos componentes.

Fabricación Aditiva por FDM

La fabricación aditiva por FDM (*Fused Deposition Modeling*) es una de las modalidades más prevalentes en la manufactura aditiva (FDM, 2021). Dado que FDM es una marca registrada, a menudo se opta por el término Fabricación por Filamento Fundido (FFF), que describe el proceso de extrusión en impresión 3D (Camburn et al., 2017). Este mecanismo se representa en la Figura 2.

Figura 2. Ilustración esquemática de los componentes esenciales de una impresora 3D estándar



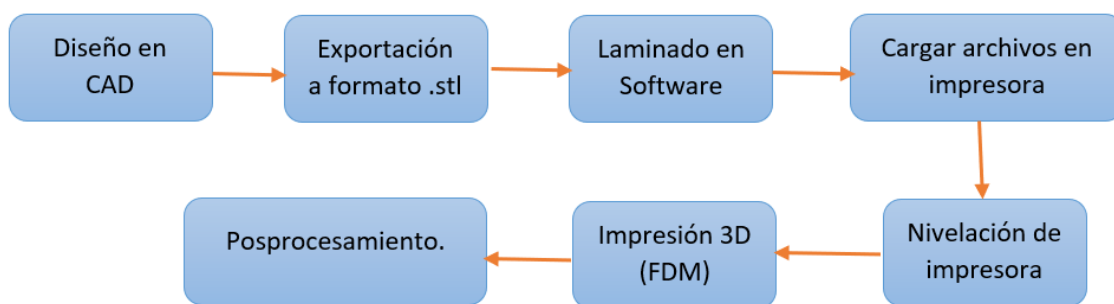
Consiste en fundir un filamento termoplástico y depositarlo capa por capa para formar un objeto tridimensional a partir de un modelo digital (Gibson et al., 2015).

Respecto a los materiales, se emplean filamentos termoplásticos tales como PLA (Ácido Poliláctico), ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), PETG (Polietileno Tereftalato Glicol), TPU (Poliuretano

Termoplástico) y compuestos con aditivos como madera, metal o fibra de carbono (Alfattni, 2022; Garcia-Dominguez et al., 2020). Estos filamentos se suministran en bobinas y se funden en un extrusor a temperaturas reguladas. El material fundido se expulsa mediante una boquilla calentada, depositándose en patrones precisos capa por capa hasta completar la pieza.

El proceso de impresión sigue la secuencia general de la manufactura aditiva (Alfattni, 2022; Camburn et al., 2017), como se detalla en la Figura 3. Un modelo tridimensional de la pieza u objeto se genera en software CAD, se exporta a formato STL (Standard Triangle Language) y se transforma en *G-code* vía un programa de laminación, conocido como del tipo *slicing* (Saleh et al., 2021).

Figura 3. Fases generales del procedimiento de impresión 3D



Existen diversos atributos en esta forma de producción (Camburn et al., 2017; Garcia-Dominguez et al., 2020; Gibson et al., 2015). Considerando los beneficios, destacan:

- Asequibilidad: es la técnica de impresión 3D más económica y extendida.
- Flexibilidad: gran diversidad de materiales accesibles.
- Adaptabilidad: óptima para prototipos y diseños únicos.
- Ecoeficiencia: menor desperdicio en comparación con métodos sustractivos.

Las desventajas destacables son:

- Resolución restringida: las capas pueden resultar visibles, impactando la textura superficial.
- Anisotropía en propiedades: la durabilidad varía según la alineación de capas.
- Eficiencia temporal: más lento para componentes complejos o voluminosos.
- Necesidad de soportes: estructuras con salientes pronunciados requieren apoyos adicionales que exigen remoción y acabado posterior.



En cualquiera de los casos anteriores, se tienen diferentes aplicaciones prácticas:

- Prototipado acelerado: adecuado para verificar conceptos y diseños.
- Enseñanza: instrumento vital en iniciativas STEM para impartir conocimientos en manufactura y diseño.
- Fabricación de componentes finales: en escenarios de personalización o volúmenes reducidos.
- Modelaje en arquitectura y arte: elaboración de maquetas y elementos ornamentales.

Relevancia del Equipamiento de Laboratorio

Frente a los desafíos de infraestructura y dotación en numerosas instituciones educativas de nivel medio y superior (pre-universitario y universitario), se exploran enfoques pedagógicos alineados con impactos y directrices de la UNESCO, así como con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Moran, 2025), particularmente el objetivo 4: *Asegurar una educación inclusiva, equitativa y de calidad, fomentando el aprendizaje permanente para todos*. En México, se consideran los Programas Nacionales Estratégicos (Pronaces, 2025), donde el Programa Nacional Estratégico de Educación promueve metodologías y recursos didácticos que favorezcan la inclusión social. En este contexto, es pertinente adoptar tecnologías avanzadas para crear módulos asequibles que sustituyan gradualmente el equipo obsoleto en laboratorios locales, de igual manera, incorporar el equipo con el que no se cuenta, debido al costo elevado de su adquisición. Esta adopción e incorporación del equipo adecuado para apoyar la enseñanza teórica fomenta simultáneamente la convergencia de disciplinas científicas y técnicas en un marco interdisciplinario. Dicha integración se denomina educación STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas, por sus siglas en inglés), un enfoque pedagógico donde se aplican conocimientos y competencias mediante proyectos o desafíos contextualizados (Kelley y Knowles, 2016). Específicamente, se identifica una brecha en la disponibilidad de módulos funcionales y asequibles para enseñar circuitos eléctricos básicos, donde los equipos comerciales existentes, aunque robustos, son costosos, difíciles de mantener y no se adaptan fácilmente a entornos con presupuestos restringidos. Abordar este tema es crucial porque contribuye a la modernización de la educación en



ingeniería, superando barreras como la obsolescencia tecnológica y la desigualdad en el acceso a recursos educativos de calidad.

Abordar este tema es crucial porque contribuye a la modernización de la educación en ingeniería, superando barreras como la obsolescencia tecnológica y la desigualdad en el acceso a recursos educativos de calidad. Su relevancia radica en varios aspectos: primero, promueve la inclusión social al desarrollar módulos didácticos de bajo costo mediante impresión 3D, lo que permite a instituciones con presupuestos limitados renovar sus laboratorios sin depender de importaciones caras, alineándose con el ODS 4 de la UNESCO para una educación inclusiva y equitativa. Segundo, fomenta la adopción de la Industria 4.0 en entornos educativos, donde la manufactura aditiva no solo reduce tiempos y costos de producción, sino que también integra habilidades digitales esenciales para los ingenieros del futuro, como el diseño CAD y el prototipado rápido. Tercero, en un contexto global de transformación digital, este enfoque resuelve problemas reales como el desperdicio de materiales en métodos tradicionales y la necesidad de personalización en herramientas educativas, mejorando la eficiencia y la sostenibilidad. A nivel académico, facilita la transición de la teoría a la práctica en cursos de electricidad, potenciando el aprendizaje experiencial en STEM y preparando a estudiantes para industrias que demandan competencias interdisciplinarias. Finalmente, su relevancia se extiende a la innovación tecnológica en países como México, donde iniciativas como Pronaces buscan materiales didácticos que promuevan la inclusión, demostrando que soluciones locales pueden tener impacto global en la formación de profesionales competentes y adaptables.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño del módulo se inicia tomando como referencia dispositivos comerciales de LabVolt por Festo (Festo Didactics, 2025), frecuentes en los medios educativos de nivel medio y superior, es decir, estudiantes pre-universitarios y universitarios. Posteriormente, se incorporan los componentes y el enfoque metodológico que se describen a continuación. Para este desarrollo, se utilizó una impresora 3D Creality (modelo ENDER-3 V3 SE), con filamento termoplástico PLA, material común y sugerido para prototipos (Saleh et al., 2021). Las especificaciones de la impresora y del PLA se resumen en la Tabla 1.

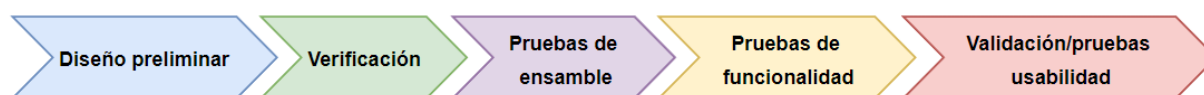


Tabla 1. Especificaciones de la impresora Creality y del filamento PLA

Características de la impresora ENDER-3 V3 SE		Características del filamento PLA (ácido poliláctico)	
Característica	Valores o especificación	Parámetro	Valores o especificación
Volumen de impresión	220 × 220 × 250 mm	Temperatura de boquilla	190 – 230 °C
Diámetro de boquilla	0.4 mm	Punto de fusión	150 °C
Altura de capa	0.1 – 0.35 mm	Temperatura de cama	45 – 65 °C
Exactitud de impresión	±0.1 mm	Resistencia a la tracción	≥ 60 MPa
Consumo de potencia	350 W	Módulo de flexión	≥ 60 MPa
Fuerza de extrusión	80 N	Diámetro	1.75 mm
Extrusión	Directa	Agrietamiento	≥ 30%
Engranaje	Doble	Temperatura de deflexión	≥ 60 °C
Materiales	PLA, PETG, TPU	Temp. de transición vítrea	≥ 50 °C

Enfoque Metodológico en Prototipado Acelerado

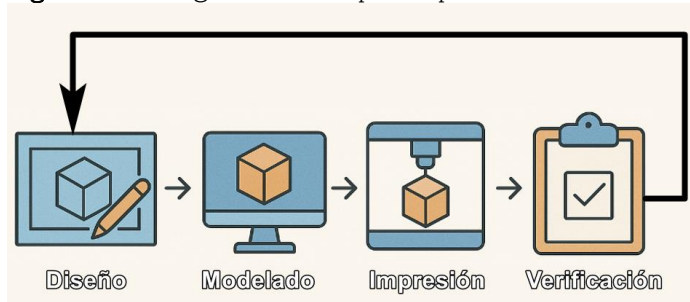
La metodología adoptada para el módulo integra dos enfoques: el proceso de diseño mecánico (Wickert y Lewis, 2013) y el prototipado rápido (Gibson et al., 2015). El primero parte de un concepto inicial que se refina hasta validar el producto, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Etapas generales del diseño en ingeniería mecánica

El prototipado acelerado (Gibson et al., 2015) se centra en dimensionar y configurar productos, previo a su fabricación, con énfasis en cumplir requerimientos mecánicos y satisfacer objetivos funcionales, apoyándose en software CAD para ensambles y planos, el proceso es iterativo (ver la Figura 5).



Figura 5. Fases generales del prototipado acelerado



El modelado 3D usando AutoCAD se resume así (Brito, 2024):

- a) Se inicia configurando el entorno en "Modelado 3D", esbozando bases 2D o primitivas 3D (cubos, cilindros) y aplicando EXTRUDE para agregar profundidad.
- b) Para manipulación y visualización, se usan comandos como 3DORBIT y el cubo de vistas para alterar perspectivas y estilos.
- c) Se ajustan modos visuales para examinar el modelo variadamente. Para refinamiento, se aplican operaciones sólidas para unir o restar volúmenes, creando formas complejas, y se agregan detalles como filetes, chaflanes o extrusiones planas mediante comandos dedicados.
- d) El renderizado produce imágenes o animaciones de alta calidad del modelo final. La exportación guarda en formatos adecuados para usos posteriores en fabricación o planificación.

Como se mencionó previamente, el software de *slicing*, o laminador, es crucial en la impresión 3D, transformando modelos 3D (STL) en instrucciones ejecutables para la impresora. Sus etapas incluyen (Camburn et al., 2017; Garcia-Dominguez et al., 2020):

- a) Segmentación en capas. Divide el modelo en secciones horizontales para impresión secuencial.
- b) Cálculo de rutas de impresión. Determina el camino preciso de la boquilla para depositar material en cada capa.
- c) Ajuste de parámetros. Permite configurar altura de capa, densidad del relleno, velocidad y temperaturas, influyendo en la calidad y en la duración de la impresión.
- d) Creación de soportes. Genera estructuras temporales para secciones suspendidas.
- e) Previsualización y simulación. Ofrece vistas anticipadas para identificar problemas previos a la impresión.

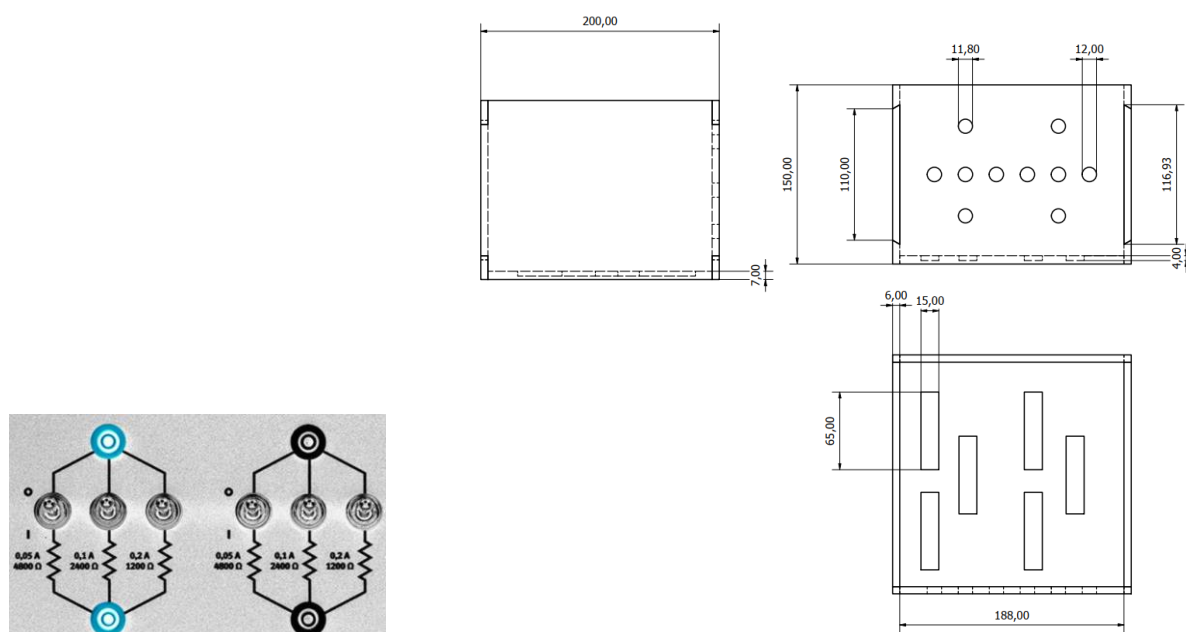


f) Producción de *G-code*. Convierte instrucciones en código geométrico interpretable por la impresora.

RESULTADOS

El concepto inicial se basa en el módulo existente en el laboratorio, pero incorpora mejoras en conectividad por medio de bananas de conexión y de montaje, considerando el material plástico. Para la interfaz frontal, donde el usuario identifica el módulo y accede a los terminales para las conexiones, se propone el diseño que se presenta en la parte izquierda de la Figura 6, con símbolos de resistores e interruptores. Este módulo es básico pero versátil, pues con él se pueden trabajar prácticas tanto en corriente directa como en corriente alterna, ya que se tratan de resistencias de aluminio, lo que permite disipación de calor utilizando ambos tipos de corriente. Asimismo, esta configuración empleando interruptores, permite trabajar configuraciones de circuitos en paralelo, en serie y en serie-paralelo. Los diseños finales en AutoCAD se muestran a la derecha de la Figura 6, con vistas dimensionadas que incluyen rebordes y lengüetas para un ensamble óptimo, adaptado al plástico impreso.

Figura 6. Módulo de resistores: izquierda muestra la representación gráfica del desarrollo; derecha presenta vistas dimensionadas del diseño propuesto, con medidas y cotas



Siguiendo el protocolo de impresión 3D, se definen los parámetros térmicos del filamento y las configuraciones de capas. Estos se optimizan mediante pruebas empíricas, ya que el filamento responde a condiciones ambientales y variaciones ligeras según el fabricante. Por ejemplo, la Figura 7



ilustra ensayos previos para afinar parámetros, asegurando material, acabado y dimensiones, de forma que se siguen los pasos que se describieron e ilustran en las Figuras 4 y 5.

Figura 7. Pruebas de impresión para determinar los parámetros finales de laminación del filamento



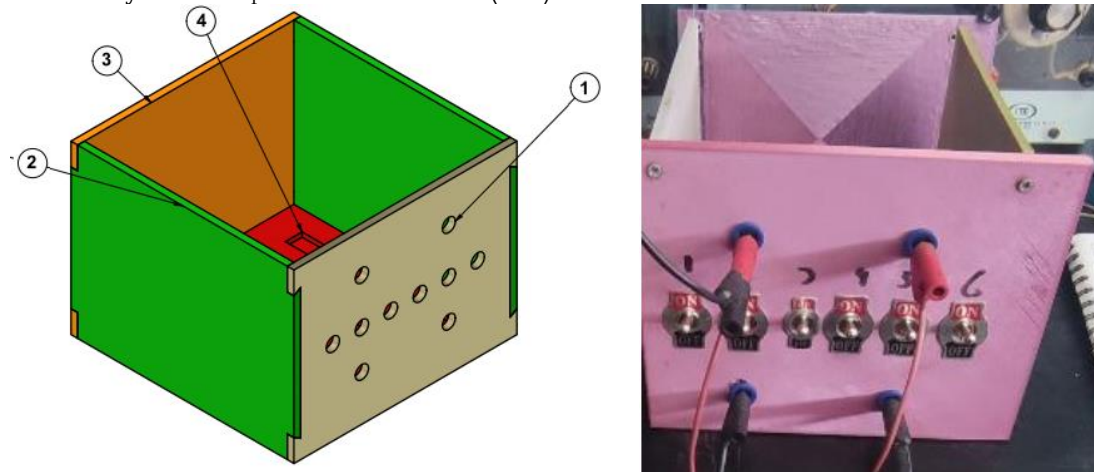
La imagen de la izquierda de la Figura 7 muestra el fenómeno de deformación (*warping*), que se ocasiona debido a temperaturas bajas en la cama de impresión lo que provoca poca adherencia a la misma; mientras que la imagen derecha de la misma Figura 7 muestra la impresión con parámetros adecuados. Los parámetros finamente usados para imprimir las partes del módulo se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de impresión definitivos

Parámetros del filamento		Parámetros de impresión	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Diámetro de la boquilla	4 mm	Altura de capa	0.28 mm
Temperatura boquilla	215 °C	Relleno	15 %
Grosor del filamento	1.75 mm	Patrón de relleno	Panal
Temperatura cama	65 °C	Grosor de paredes	3 mm

El diseño final, que integra componentes eléctricos en la cara frontal y las superficies del módulo, se presenta a la izquierda de la Figura 8, identificándose en esta imagen las siguientes partes: 1-cara trasera, 2-caras laterales, 3-cara superior, 4-base. La imagen derecha de la Figura 8 muestra el módulo fabricado, ensamblado con elementos eléctricos y en prueba funcional.

Figura 8. Vista en perspectiva del ensamble en AutoCAD (izq.); imagen real del módulo impreso, montado y con componentes eléctricos (der.)



DISCUSIÓN

El diseño y módulo elaborado por medio de manufactura aditiva, se enfoca en apoyar la enseñanza de nivel ingeniería (nivel superior) a diferencia otros trabajos (Chen et al., 2023; Tseng y Kawahara, 2021) y se basan en módulos comerciales que se encuentran en el mercado desde hace décadas, por lo que su aceptación ha sido comprobada. El módulo permite lograr prácticas versátiles de diferentes configuraciones, además, funciona tanto en corriente alterna como en corriente directa, evita dificultad de conexión, a diferencia de una *protoboard*, pero mantiene el desafío de aprender la manera de realizar conexiones cableadas para reforzar el aprendizaje de las configuraciones en las conexiones.

CONCLUSIONES

Se creó y produjo un módulo educativo para respaldar experimentos en electricidad, enfocándose en un set de resistores empleado en circuitos básicos de corriente directa y corriente alterna a bajo voltaje. El proyecto culmina con la generación exitosa y verificación operativa de un módulo económico, validando la impresión 3D como alternativa efectiva para renovar equipo obsoleto de laboratorio. Representa un caso práctico de integración electromecánica, permitiendo a estudiantes aplicar teoría y diseño de forma tangible. Ilustra la resolución de desafíos multifacéticos (térmicos, mecánicos, eléctricos) mediante diseño ingenieril adecuado y métodos de fabricación contemporáneos y asequibles a través de la tecnología propia de la Industria 4.0.



Debido a que el módulo propuesto se presenta como versátil, este trabajo ofrece una base sólida para enfatizar y expandir el potencial de aplicación del módulo más allá del contexto inicial, gracias a su enfoque interdisciplinario y su metodología replicable. Sin duda, la aplicación puede ir desde nivel primaria y secundaria (con conexiones predefinidas) hasta nivel medio superior y superior (como lo hace de inicio esta propuesta).

Como trabajos futuros, se prioriza la ampliación a módulos obsoletos o requeridos para diversas prácticas, aplicando la misma aproximación para diseños básicos en circuitos eléctricos. Este módulo sirve como base para ampliar a diferentes tipos de elementos de circuito básicos y especializados, asimismo, de electrónica. Se planea simulación en SolidWorks para análisis de resistencia y tensiones, optimizando diseños y evaluando polímeros alternos. Además, se busca refinamiento continuo basado en retroalimentación por parte de docentes y estudiantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfattni, R. (2022). Comprehensive study on materials used in different types of additive manufacturing and their applications. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 7(1), 92-114. <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2022.7.1.007>
- Brito, A. (2024). *AUTOCAD Y AUTOCAD LT 2025: Guía de inicio rápido*. B3DA Learning.
- Camburn, B., Viswanathan, V., Linsey, J., Anderson, D., Jensen, D., Crawford, R., Otto, K., Wood, K. (2017). Design prototyping methods: State of the art in strategies, techniques, and guidelines. *Design Science*, 3, e13. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.10>
- Chen, Y., Ku, N., Lin, B., Sun, J., Wang, A., & Montclare, J. K. (2025). Tangible 3D-printed educational aids: Enhancing conceptual understanding of circuit construction fundamentals. *Discover Education*, 4(1), 98. <https://doi.org/10.1007/s44217-025-00493-8>
- FDM - Modelado por deposición fundida, <https://www.3ds.com/es/make/service/3d-printing-service/fdm-fused-deposition-modeling> (diciembre, 2021).
- Festo Didactics, https://labvolt.festo.com/Website/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-8353-00_transformer (septiembre, 2025).



- Garcia-Dominguez, A., Claver, J., Camacho, A. M., Sebastian, M. A. (2020). Analysis of general and specific standardization developments in additive manufacturing from a materials and technological approach. *IEEE Access*, 8, 125056-125075.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3005021>
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. 2015. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing; New York, NY. Springer.
- Kelley, T. R., Knowles, J. G. (2016). A conceptual framework for integrated STEM education. *International Journal of STEM Education*, 3(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s40594-016-0046-z>
- Moran, M., «Educación», Desarrollo Sostenible, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/education>, (noviembre, 2025).
- Pronaces (2025). Programas Nacionales Estratégicos, SECIHTI, <https://secihti.mx/pronaces> , (noviembre, 2025).
- Rana, B., Rathore, S. S. (2023). Industry 4.0 – Applications, challenges and opportunities in industries and academia: A review. *Materials Today: Proceedings*, 79, 389–394.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.162>
- Saleh Alghamdi, S., John, S., Roy Choudhury, N., Dutta, N. K. (2021). Additive manufacturing of polymer materials: Progress, promise and challenges. *Polymers*, 13(5), 753.
<https://doi.org/10.3390/polym13050753>
- To, T. T., Al Mahmud, A., & Ranscombe, C. (2025). A framework for integrating additive manufacturing into engineering education: Perspectives of students and educators. *European Journal of Engineering Education*, 50(2), 298-319. <https://doi.org/10.1080/03043797.2024.2358368>
- To, T. T., Al Mahmud, A., & Ranscombe, C. (2023). Teaching sustainability using 3d printing in engineering education: An observational study. *Sustainability*, 15(9), 7470.
<https://doi.org/10.3390/su15097470>
- Tseng, T., & Kawahara, Y. (2021). Circuit assemblies: Electronic modules for interactive 3d-prints. *Designing Interactive Systems Conference 2021*, 1115-1128.
<https://doi.org/10.1145/3461778.3462024>



Vukašinović, V., Gordić, D., Šušteršič, V., Josijević, M., & Nikolić, J. (2024). The implementation of 3d printing in engineering education in the field of hydraulic and pneumatic components. 3D Printing and Additive Manufacturing, 11(4), e1670-e1678.
<https://doi.org/10.1089/3dp.2023.0059>

Wickert, J. A., Lewis, K. E. (2013). An introduction to mechanical engineering (3rd ed.). Cengage Learning.

