

CONESCAPANHONDURAS2025paper67.pdf

 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

Document Details

Submission ID

trn:oid:::14348:477781909

Submission Date

Jul 31, 2025, 11:25 PM CST

Download Date

Aug 12, 2025, 2:43 PM CST

File Name

CONESCAPANHONDURAS2025paper67.pdf

File Size

604.7 KB

6 Pages




4,484 Words

25,018 Characters

13% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Top Sources

- 12%  Internet sources
- 9%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags




0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

- 12%  Internet sources
- 9%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	
www.icaair.net		3%
2	Internet	
semnastera.polteksmi.ac.id		<1%
3	Internet	
iarjset.com		<1%
4	Internet	
trepo.tuni.fi		<1%
5	Publication	
Jyothisree Kaithamattathu Ramanan, Reneesh C. Zacharia, Able Thomas, Anagha ...		<1%
6	Publication	
Peter Drgona, Rastislav Stefun, Lubos Stefke. "Design and Practical Realization of ...		<1%
7	Internet	
ojs.studiespublicacoes.com.br		<1%
8	Internet	
etd.lsu.edu		<1%
9	Internet	
ideas.repec.org		<1%
10	Internet	
rekayasamesin.ub.ac.id		<1%
11	Internet	
hemeroteca.unad.edu.co		<1%

12	Internet	quieora.ink	<1%
13	Internet	www.mdpi.com	<1%
14	Internet	avestia.com	<1%
15	Internet	repositorio.utn.edu.ec	<1%
16	Internet	forum.arduino.cc	<1%
17	Internet	10wvw.easychair.org	<1%
18	Internet	www.coursehero.com	<1%
19	Internet	boletinacia.blogspot.com	<1%
20	Internet	de.slideshare.net	<1%
21	Internet	nubip.edu.ua	<1%
22	Internet	www.dykinson.com	<1%
23	Internet	www.o-leading.com	<1%
24	Internet	www.youtube.com	<1%

Fabricación y Aplicación de PCB en Sistemas de Control: Comparativa entre Método Tradicional y CNC

1

line 1: 1st Given Name Surname
line 2: dept. name of organization
(of Affiliation)
line 3: name of organization (of
Affiliation)
line 4: City, Country
line 5: email address or ORCID

line 1: 2nd Given Name Surname
line 2: dept. name of organization
(of Affiliation)
line 3: name of organization (of
Affiliation)
line 4: City, Country
line 5: email address or ORCID

line 1: 3rd Given Name Surname
line 2: dept. name of organization
(of Affiliation)
line 3: name of organization (of
Affiliation)
line 4: City, Country
line 5: email address or ORCID

line 1: 4th Given Name Surname
line 2: dept. name of organization
(of Affiliation)
line 3: name of organization (of
Affiliation)
line 4: City, Country
line 5: email address or ORCID

23

Abstract—Los avances recientes en tecnologías de manufactura han permitido optimizar procesos, tiempos y recursos en la producción de componentes electrónicos. Este estudio presenta un análisis comparativo experimental entre dos métodos de fabricación de placas de circuito impreso (PCB): el enfoque convencional manual y una alternativa automatizada mediante una máquina de control numérico computarizado (CNC). Ambos métodos fueron evaluados en un entorno académico utilizando prototipos electrónicos reales, considerando criterios como tiempo de fabricación, precisión, uso de materiales, seguridad y repetibilidad. Los resultados muestran que la integración de tecnología CNC mejora significativamente la eficiencia y calidad del proceso, reduce el margen de error humano y alinea la formación estudiantil con los estándares industriales. Esta implementación no solo moderniza las prácticas de laboratorio, sino que también fortalece las competencias técnicas en electrónica y manufactura digital.

Keywords—CNC, fabricación de PCB, optimización de procesos, educación en ingeniería, automatización, electrónica.

I. INTRODUCCIÓN

18

Las placas de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés) son elementos fundamentales en la fabricación de dispositivos electrónicos, al permitir la interconexión organizada de componentes mediante pistas conductoras sobre una base aislante. En contextos educativos, y asociado a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) la construcción de PCBs constituye una herramienta didáctica esencial, ya que integra conocimientos de diseño eléctrico, manufactura, uso de software especializado y manipulación de componentes [1], [2]. Tradicionalmente, el proceso de fabricación de PCBs en entornos académicos se realiza de manera manual, implicando técnicas como la transferencia térmica de diseños, el uso de ácidos para grabado y perforaciones mecánicas rudimentarias. Aunque este enfoque permite comprender los fundamentos del proceso, presenta diversas limitaciones, tales como baja precisión, alto consumo de tiempo, riesgos para la salud y una alta dependencia de la destreza individual del estudiante.

Frente a estas limitaciones, la implementación de herramientas tecnológicas como las máquinas de control numérico computarizado (CNC) surge como una alternativa viable para modernizar el proceso formativo. Estas máquinas

permiten automatizar tareas críticas del proceso, mejorando la calidad del producto final y reduciendo la variabilidad entre intentos.

Estudios sobre el tema abordado muestran diversos enfoques sobre diseño y optimización de máquinas CNC aplicadas a la fabricación de PCBs y prototipado cerámico. Se destacan avances en accesibilidad, control digital y eficiencia del proceso. Los trabajos [3] y [4] abordan el desarrollo de máquinas CNC de bajo costo para aplicaciones específicas. El estudio en [3] se centra en el prototipado cerámico mediante parámetros de corte optimizados, mientras que los autores en [4] proponen una máquina para fabricar PCBs, con control mediante G-code, destacando su simplicidad, seguridad y precisión. Ambos enfatizan la accesibilidad y reducción de costos, aunque [3] prioriza la calidad superficial y [4] el sistema de control. En cuanto a metodología, el trabajo en [3] se basa en pruebas físicas para ajustar condiciones de fresado, mientras que el estudio presentado en [4] emplea conversión de archivos DXF y control con microcontroladores. Una se orienta a parámetros experimentales, la otra al control digital automatizado.

Por su parte, los trabajos en [5] y [6] exploran mejoras en la producción de PCBs. Los autores en [5] proponen una máquina CNC con hardware abierto (Arduino y GRBL), destacando trazos precisos y prototipado rápido. El estudio en [6] se enfoca en optimizar rutas de perforación usando el algoritmo del viajante (TSP), logrando mayor eficiencia en tiempo. Mientras que en [5] se resalta accesibilidad y precisión, y por otro lado [6] prioriza la eficiencia algorítmica del proceso. En términos metodológicos, la metodología presentada en [5] combina diseño CAD y software libre para control CNC; mientras que en [6] se aplica clustering y TSP para reducir tiempos. Ambos logran mejoras en precisión y eficiencia, pero desde enfoques distintos: uno práctico y otro algorítmico.

Finalmente, los autores en [7], [8] y [9] integran inteligencia artificial. El trabajo presentado en [7] desarrolla un firmware CNC con Arduino; por otro lado [8] y [9] aplican sistemas de razonamiento basado en casos (CBR) para optimizar parámetros y reducir tiempos. Mientras que [7] se enfoca en control físico, [8] y [9] incorporan técnicas de IA para mejorar calidad y eficiencia.

17

Este trabajo surge de la necesidad de mejorar la eficiencia, calidad y seguridad en la fabricación de PCBs en los laboratorios de Ingeniería Eléctrica Industrial, donde el método tradicional presenta limitaciones como baja precisión, largos tiempos de ejecución y riesgos en la manipulación de materiales. Aunque existen estudios sobre diseño de máquinas CNC y algoritmos de optimización para PCBs, son escasos los que documentan su implementación en contextos educativos reales.

Este artículo atiende ese vacío mediante una evaluación experimental que compara el método tradicional y automatizado, proponiendo un procedimiento replicable para laboratorios académicos. Entre los objetivos específicos se incluyen:

- Documentar y comparar los pasos, tiempos y resultados obtenidos en ambos métodos.
- Analizar la precisión, seguridad y repetibilidad del proceso con CNC.
- Establecer un procedimiento replicable que pueda ser implementado en otros cursos o instituciones.
- Fortalecer la formación técnica de los estudiantes mediante el uso de herramientas alineadas con estándares industriales.

Con base en estos objetivos, se desarrollaron dos prototipos electrónicos, fabricados mediante ambas metodologías, documentando rigurosamente los resultados con el fin de validar la propuesta.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

En 1943, durante la Segunda Guerra Mundial, la electrónica fue clave en el desarrollo de artillería y bombas, destacando el uso de PCB en fusibles de proximidad. Paul Eisler introdujo un método de grabado de cobre sobre vidrio. Con la llegada del transistor, surgió la necesidad de reducir componentes, lo que llevó en 1961 a la patente de tecnologías de huecos, multicapas y circuitos integrados, fundamentales para placas compactas en telecomunicaciones y aeroespacio. Con la creciente demanda, el diseño evolucionó hacia trazos más finos y vías pequeñas, esenciales en dispositivos compactos de alto rendimiento [10], [11]. Para el propósito de la investigación el tipo de placa utilizada es de la siguiente categoría [12]:

- Según la Capa (Placa de un solo lado): Contienen solo una capa de material conductor, son una buena opción para diseños que no requieren altas frecuencias o velocidades de señal.
- Según tipo de dureza (Rígida): Soportan presiones de uso diario sin romperse, son las más comunes.

Las aplicaciones desarrolladas se enmarcan en dos enfoques: un variador de velocidad para motor de corriente directa (DC) fabricado con el método tradicional, y un circuito temporizador basado en un circuito integrado, producido con el método de Máquina CNC. Ambas aplicaciones pertenecen a la categoría:

- Controles Industriales y Robótica: Incluye controladores lógicos programables (PLC), interfaces de operador, sistemas de automatización y visión, entre otros.

En cuanto al proceso de fabricación de PCBs, existen múltiples métodos, siendo el más común entre estudiantes y principiantes el método tradicional, por su simplicidad y bajo costo. A seguir se muestra el procedimiento para la elaboración vía método tradicional.

A. Método Tradicional de Fabricación de PCB

A seguir son detalladas las etapas para la fabricación de PCBs utilizada en el presente trabajo:

1) Etapa 1: Diseño del circuito

- Se esquematiza el circuito para determinar la conexión de los componentes a través de algún software de diseño como *Electrical Computer Aided Design (CAD)*, *MultiSIM*, etc. Para propósitos de este estudio se realizó el diseño en *MultiSIM*.
- Se transforma el esquema en un diseño físico de la PCB. En este diseño se define la disposición de los componentes y las rutas o caminos, en el caso del proceso manual es importante no dejar curvas con ángulos rectos, ya que, son más propensos a arruinarse en etapas posteriores. Para este paso se realiza el diseño en softwares como *PCB Wizard*.

2) Etapa 2: Impresión del circuito

- Se imprime el archivo en una hoja de papel satinado y con impresora láser, asegurando que el diseño esté en modo espejo para realizar una transferencia exitosa.

3) Etapa 3: Limpieza de Placa

- Se lija la superficie de la placa suavemente con una hoja de grano 280-320 añadiendo un poco de agua.
- Se limpia la placa con un algodón y se seca por completo para eliminar excedentes del paso anterior.

4) Etapa 4: Transferencia del diseño

- Se coloca el diseño impreso en el papel especial sobre la placa en la cara previamente preparada, y se fija con masking tape para evitar movimientos no deseados.
- Con la ayuda de una plancha convencional a temperatura media baja, se realiza el planchado uniforme de la placa con el papel, esto con el fin de que se transfiera la imagen por completo. Se recomienda evitar dejar la plancha sobre la placa durante mucho tiempo sin moverla, ya que, puede provocar que la placa se queme.
- Una vez transferido, se lava con agua el papel restante dejando nada más la tinta transferida.

5) Etapa 5: Perforado de la placa

- Con la ayuda de un dremel o un taladro al que se le pueda ajustar la velocidad, se realizan las perforaciones deseadas según el diseño ya transferido, se recomiendan brocas de entre 0.5-0.8 mm.

6) Etapa 6: Corrección de caminos

- Si gracias a etapas anteriores los caminos se dañaron un poco, se recomienda corregir los caminos con marcador permanente, preferiblemente Sharpie como alternativa para evitar conexiones no deseadas en el circuito.

7) Etapa 7: Revelado

- El ácido muriático, conocido como ácido clorhídrico se utiliza como parte de una mezcla con partes iguales de agua oxigenada y ácido para atacar el cobre no deseado en las placas PCB y de esa forma separar los caminos, dejando nada más el material aislante que se encuentra en la capa inferior del cobre. Se sumerge la placa en la mezcla durante unos minutos hasta que el cobre no deseado sea eliminado. La reacción a pesar de ser rápida y efectiva también puede ser violenta, ya que, libera gases peligrosos, por lo que se recomienda usar equipo de protección y realizar el proceso en un área ventilada.

- Luego del paso anterior, se vuelve a lijar la placa para eliminar restos que no se eliminaron con el ácido muriático.

8) Etapa 8: Inspección

- Se realiza una inspección visual para asegurarse que no haya defectos visibles en las conexiones, y si se dispone de un multímetro lo ideal sería medir continuidad en los caminos para asegurar la funcionalidad del circuito.

9) Etapa 9: Soldadura de componentes

- Como paso final se colocan y sueldan los componentes del circuito en sus respectivos lugares con la ayuda de un cautín y estaño para fijar los elementos.

Si dispone de los recursos, es posible realizar las PCB de una forma automatizada y controlada mediante el uso de una máquina CNC conforme se muestra en la sección II.B a seguir.

B. Fabricación de PCB con máquina CNC

Una máquina CNC dedicada para el mecanizado de placas de circuito impreso, se define como un sistema automatizado que utiliza programación informática, o control numérico por computadora para controlar sus movimientos y operaciones, más precisamente para realizar acciones de fresado o perforación de PCB [8].

Existen diversos tipos de Máquinas CNC, las que son utilizadas mayormente para fabricación de placas de circuito impreso se clasifican según el sistema de control, el número de ejes y el tipo de corte. El modelo utilizado para el estudio es el Genmitsu CNC Router 3018-PRO, el cual se clasifica como una máquina CNC de control de posicionamiento punto a punto, donde la herramienta se desplaza a un punto específico antes de iniciar el mecanizado desde esa referencia. Opera con tres ejes (X, Y y Z), siendo esta una configuración común en máquinas CNC. Además, se trata de un enrutador CNC, adecuado para cortar materiales blandos en superficies planas, sustituyendo herramientas como perforadoras, sierras y moldureras de husillo.

Este modelo está diseñado para trabajos de grabado y mecanizado en diversos materiales como madera, plásticos y algunos materiales blandos. Es importante usar la fresa adecuada y realizar una correcta calibración de los parámetros para evitar dañar la placa y obtener trazos más precisos. La máquina utilizada en este estudio es presentada en la Figura 1 cuenta con una estructura fabricada en perfiles de aluminio y placas de resina fenólica, lo que le proporciona estabilidad y durabilidad, con un área de trabajo de 300 mm x 180 mm. Utiliza motores paso a paso para controlar los movimientos en los ejes X, Y y Z, y un motor de husillo que permite el uso de diferentes

herramientas como láser, broca de fresado o broca perforadora. Es compatible con el software libre GRBL, que permite controlar la máquina mediante archivos G-code, editar textos e imágenes, y realizar distintos tipos de grabado (contorno, puntos, blanco y negro o escala de grises). La fuente de alimentación es de 24 V y puede operar conectada a una computadora vía USB o de forma autónoma mediante un controlador offline [14]. La secuencia de preparación utilizada para utilizar la Máquina CNC para fabricar PCB es presentada en la Tabla I.



Fig. 1. Máquina Sainsmart Genmitsu CNC Router 3018-PRO [14].

TABLE I. PROCEDIMIENTO PARA EL PROCESO DE CNC

Proceso	Descripción
Layout del Circuito	Se produce el diseño en la placa incluyendo los caminos, espacios de componentes y posiciones de perforación, a través de softwares de diseño como KiCAD, PCB Artist, Proteus. De los cuales se obtiene un archivo en formato .Gerber
Procesado de G-Code	Se realiza la importación del archivo anterior a la aplicación FlatCAM, software que permite preparar diseños de circuitos impresos para fabricarlos en una máquina CNC, generando el G-Code para enrutamiento a partir de archivos Gerber. El G-code es el lenguaje que se utiliza para crear las instrucciones que recibe la máquina CNC.
Procesado en la Máquina CNC	Se introduce el código G-code a la Máquina CNC a través del software GRBL Control, encargado de mandar las señales de control para accionar la máquina a través de una conexión USB.

III. METODOLOGÍA

Las Figuras 2 y 3 resumen el procedimiento metodológico aplicado en este estudio.

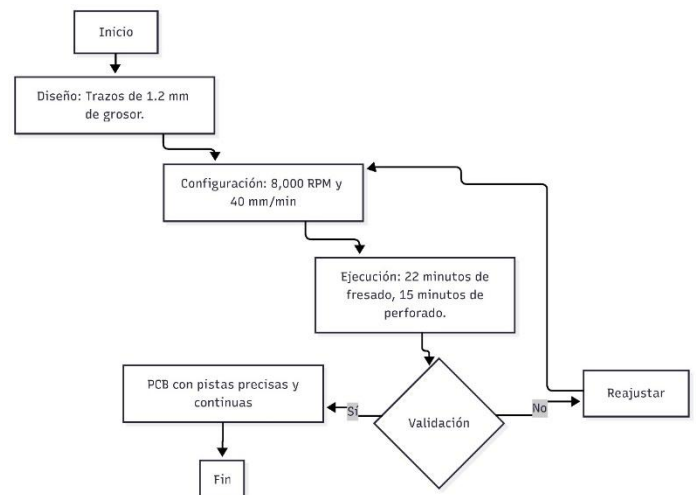


Fig. 2. Metodología utilizada en el enfoque CNC

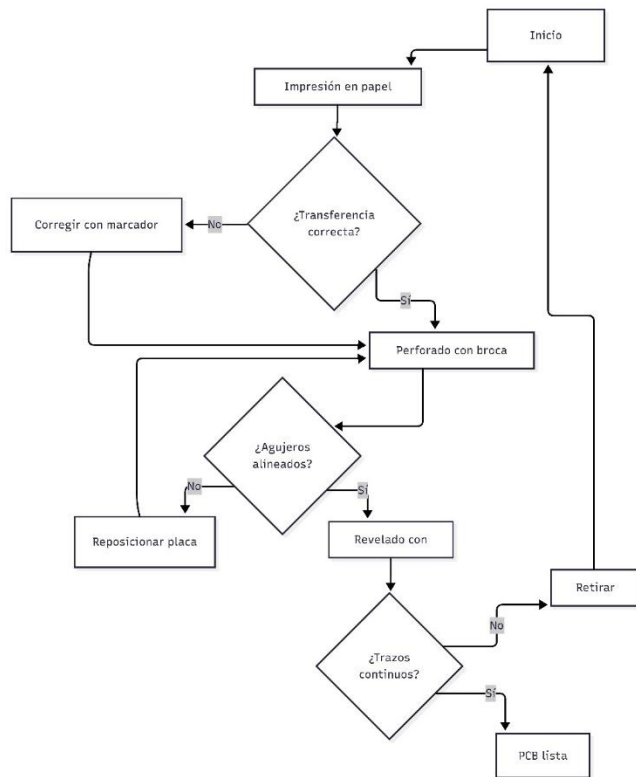


Fig. 3. Metodología utilizada en el enfoque tradicional

Se partió de un enfoque mixto, comenzando con la documentación del método tradicional de fabricación de PCB mediante una guía de observación que permitió identificar las principales limitaciones del proceso manual. Posteriormente, se implementó el método con máquina CNC, abordando la generación de archivos desde software especializados (KiCAD, FlatCAM, GRBL Control) y ejecutando múltiples pruebas para ajustar parámetros operativos. Ambos métodos fueron comparados según criterios técnicos y pedagógicos como calidad del circuito, tiempo de fabricación, facilidad de uso, costos y aplicabilidad para estudiantes de Ingeniería Eléctrica.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A. Resultados y Discusiones

Un enfoque mixto que combinó métodos cualitativos y cuantitativos para evaluar las ventajas de integrar una máquina CNC en la fabricación de PCB es presentado en esta sección como parte de la metodología detallada en la sección anterior. La Figura 4 muestra el resultado final obtenido mediante el método tradicional, donde se evidencian errores de alineación durante la transferencia del circuito, el perforado y el revelado, atribuidos principalmente a la falta de herramientas adecuadas y a la alta sensibilidad de estos procesos a errores humanos. Por otro lado, la Figura 5 presenta los intentos iniciales con la máquina CNC, los cuales revelaron desafíos como profundidad de fresado incorrecta, desnivelación de la placa y trazos incompletos. Sin embargo, mediante iteraciones controladas y ajustes en los softwares FlatCAM y GRBL Control, se lograron corregir estos inconvenientes, optimizando así la precisión y calidad del producto final. Ambas figuras ilustran la evolución

del proceso y resaltan las mejoras alcanzadas con la adopción de la tecnología CNC.

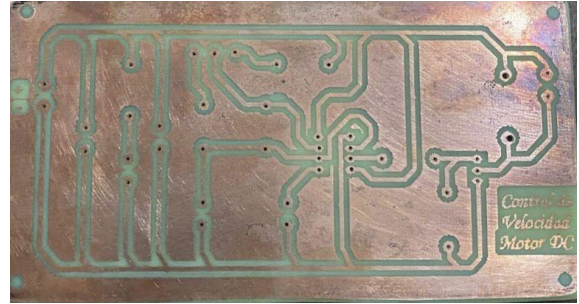


Fig. 4. Resultado final de PCB obtenida de Método tradicional

Para el intento final, presentado en la Figura 6, se corrigió la posición de los fijadores que sostienen la placa a la base de la CNC con el fin de nivelar la placa en toda su área. La velocidad de giro se configuró en 8,000 rpm, la velocidad de paso (de movimientos en coordenadas X y Y) se colocó en 40mm por minuto. Posteriormente se estableció el punto origen para todas las coordenadas de forma que el trazo quedara preciso. La broca de fresado utilizada fue de 0.1 mm de 20° tipo V. La máquina realizó los trazos durante 22 minutos sin problema, obteniendo caminos uniformes y precisos. Seguidamente se comprobó la continuidad de los caminos utilizando un multímetro para corroborar la eficiencia de las mismas.

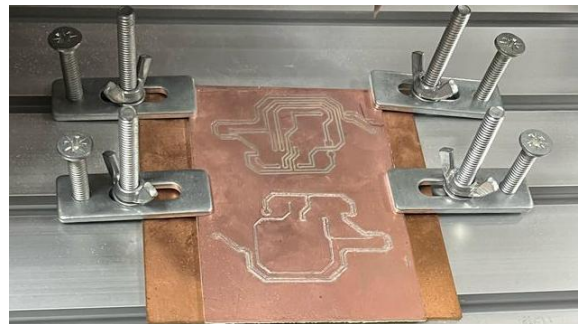


Fig. 5. Intentos de Método con Máquina CNC.

Inmediatamente, sin mover la placa de su lugar, se utilizó el archivo de perforado con el mismo punto de origen para que la máquina reconozca las ubicaciones de los agujeros. Se realizó el cambio de herramienta por una broca de perforado de 0.9 mm, ajustando el origen del punto Z nuevamente debido a que la profundidad de la nueva herramienta difiere de la de fresado. La máquina realizó el perforado durante 15 minutos sin problemas, obteniendo agujeros de posición precisa.

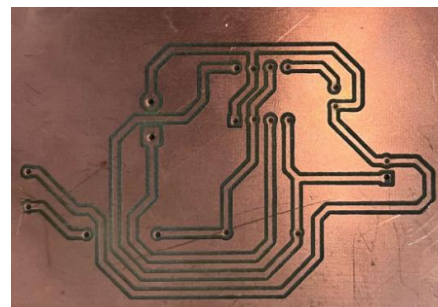


Fig. 6. Resultado final de PCB fabricada con Máquina CNC

B. Comparación entre ambos métodos

A partir de las informaciones y pruebas recopiladas fue posible elaborar la Tabla II que muestra una comparación entre los métodos tradicional y vía Máquina CNC. Podemos observar que el uso de la máquina CNC para el proceso de fabricación de PCB reduce significativamente el tiempo de ejecución de cada etapa y ofrece resultados consistentes, con baja variabilidad, permitiendo la realización de proyectos de mayor precisión y altamente repetibles. A diferencia del método tradicional que tiene un comportamiento bajamente predecible, y dependiente de diversos factores para que se obtengan resultados exitosos.

TABLE II. COMPARACIÓN DE FACTORES PARA AMBOS MÉTODOS

Factor	Proceso Tradicional	Proceso con Máquina CNC
Conocimientos previos	Softwares de Diseño como KiCAD o PCBWizard.	Softwares de diseño: KiCAD o PCBWizard. Software de procesamiento de G-Code, FlatCAM. Software de control de la Máquina CNC, GRBL Control.
Tiempo de fabricado	Más de 9 horas	2 horas
Recursos	Impresión de circuito en papel satinado, placa de baquelita virgen, lija de punto suave, brocas de perforado, ácido muriático, agua oxigenada, marcador permanente, <i>masking tape</i> .	Placa de Baquelita virgen.
Precisión y Calidad obtenida	Media y altamente dependiente de cada etapa del proceso debido a la facilidad del error.	Alta, debido al control automático a través de softwares.
Seguridad	Media, se manipulan herramientas y sustancias químicas de forma directa.	Alta para operador. Media para la máquina, una mala configuración puede provocar daños en la misma.
Perforado	De difícil ejecución gracias a herramientas no adecuadas.	De fácil ejecución debido a la precisión mecánica de la CNC.
Repetibilidad	Baja, debido al tiempo de fabricado, recursos y altas variaciones entre cada intento, gracias a que depende directamente de la habilidad del operador.	Alta gracias a la automatización del proceso y el uso de softwares para la configuración de parámetros.

C. Guía de Procedimiento para la fabricación de placas PCB

Visando la replica del estudio o estudios asociados a la fabricación, a seguir se detalla el manual de fabricación de PCB con CNC. Dentro de los materiales y herramientas necesarias, podemos citar las siguientes:

- Placa de cobre tipo baquelita virgen (recomendada: 70x100 mm).
- Software de diseño de esquemas eléctricos: **KiCAD**.
- Software CAM: **FlatCAM**.
- Software de control CNC: **GRBL Controller**.
- Brocas para fresado y perforado (según especificación del diseño).
- Máquina CNC compatible con GRBL.

- Aceite multiusos (recomendable como lubricante).
- Alcohol isopropílico.
- Multímetro digital.

A seguir el procedimiento paso a paso.

1) Diseño de la PCB

- Diseñar el esquema eléctrico en KiCAD, ajustando el grosor de las pistas al tamaño deseado, ya que será replicado por la máquina CNC.
- Exportar los archivos en formato Gerber (para las pistas) y Excellon (para los taladros).

2) Generación del Código G

- Importar los archivos Gerber y Excellon en FlatCAM.
- Configurar los parámetros de fabricación: trayectorias de fresado y perforado, herramientas, tipo y diámetro de broca, velocidad de rotación, velocidad de avance y alturas de desplazamiento. Se recomienda utilizar velocidades de rotación más altas con brocas más delgadas, para reducir el desgaste.
- Generar los archivos G-code para el trazado y perforado.

3) Configuración del Software CNC

- Importar los archivos G-code a GRBL Controller.
- Configurar los movimientos manuales para establecer el punto de origen (coordenadas X, Y, Z). Es importante notar que esta configuración no modifica los parámetros definidos previamente en FlatCAM.

4) Preparación de la Placa

- Limpiar la superficie de la placa con alcohol.
- Fijar la placa sobre la base de la CNC usando sujetadores, procurando que el área de contacto con los fijadores sea mínima para evitar levantamientos.
- Energizar la máquina y conectarla a la computadora mediante el cable USB.

5) Fresado de la Placa

- Verificar la conexión de la máquina en GRBL Controller.
- Realizar una prueba para determinar la profundidad adecuada de fresado. Ajustar el eje Z y establecer el punto cero. Asegurar que el área de trazado esté dentro de los límites de la placa y libre de interferencia con los sujetadores.
- Aplicar una capa delgada de lubricante (aceite multiusos) para mejorar el acabado.
- Iniciar el proceso mediante la opción "Send". Supervisar constantemente el proceso y tener a mano un método rápido de desactivación en caso de emergencia.
- Esperar a que el fresado finalice.

6) Perforado de la Placa

- Sin mover la placa ni cerrar la aplicación, cargar el archivo G-code de perforado en GRBL Controller para conservar el mismo punto de origen.
- Cambiar la broca de fresado por la de perforado, seleccionando el diámetro adecuado según el diseño.
- Ajustar únicamente la coordenada Z para definir la profundidad de perforado.
- Enviar el comando y monitorear el proceso hasta su finalización.

7) Acabado

- Retirar la placa y limpiarla nuevamente con alcohol isopropílico.
- Verificar la continuidad del circuito con un multímetro.
- Proceder al montaje de componentes y aplicación de soldadura.

Finalmente, la Tabla III presenta los errores más comunes y las soluciones obtenidas a partir del experimento.

TABLE III. COMPARACIÓN DE FACTORES PARA AMBOS MÉTODOS

Problema	Causa probable	Solución recomendada
Fresado no uniforme	Placa desnivelada o broca dañada	Verificar nivelación y revisar el estado de la broca
Trayectorias imprecisas	Offset incorrecto o juego mecánico (backlash)	Ajustar parámetros en software y asegurar mecánicamente tornillos
Rotura de broca	Velocidad inadecuada o placa mal sujeta	Usar al menos 4000 rpm y asegurar correctamente la placa
Pérdida del punto de origen	Reajuste o movimiento accidental	Realizar perforaciones manualmente con cuidado
Agujeros desplazados	Herramienta mal ajustada o velocidad excesiva	Reajustar herramienta y reducir levemente la velocidad
Quemaduras o derretimiento	Calor excesivo por fricción	Aplicar lubricante para enfriar la superficie
Fresado no uniforme	Placa desnivelada o broca dañada	Verificar nivelación y revisar el estado de la broca

V. CONCLUSIONES

Los hallazgos de esta investigación evidencian que la integración de una máquina CNC en el proceso de fabricación de PCBs en entornos educativos ofrece múltiples beneficios en términos de precisión, eficiencia operativa y formación técnica. La implementación de un procedimiento replicable y basado en experiencias prácticas contribuye a la modernización de los laboratorios y fortalece el enfoque práctico de la enseñanza en Ingeniería Eléctrica.

Además, se confirma que el uso de esta tecnología potencia el desarrollo de habilidades técnicas esenciales, como el manejo de software de diseño y la operación de equipos de manufactura digital. No obstante, también se destaca la necesidad de considerar las limitaciones asociadas al acceso y mantenimiento

de estos equipos, especialmente en contextos con restricciones presupuestarias. En resumen, la inclusión de la tecnología CNC en el ámbito académico no solo es viable, sino recomendable, ya que permite a los estudiantes materializar sus diseños, enfrentar retos reales y prepararse de manera más sólida para los desafíos del ejercicio profesional en el sector eléctrico-electrónico.

REFERENCES

- [1] M. E. de lima Tostes *et al.*, "Aplicação dos objetivos do desenvolvimento sustentável na Amazônia: um estudo de caso na Universidade Federal do Pará (UFPA)", *Peer Review*, vol. 5, núm. 20, Art. núm. 20, oct. 2023, doi: 10.53660/1073.prw2627.
- [2] R. Nascimento, J. Reis, M. Printes, D. Barone, J. Tabora, y M. Tostes, "Augmented Reality Applications in Mathematics and Science: Exploring Pedagogical Viability in the Amazon Region", en *2023 32nd Annual Conference of the European Association for Education in Electrical and Information Engineering (EAEIE)*, jun. 2023, pp. 1–6. doi: 10.23919/EAEIE55804.2023.10181668.
- [3] A. Intarapadung, "Development of Mini CNC Machine Design and Building for Making Ceramic Cup and Bowl Prototype", *JST*, vol. 29, núm. 3, ene. 2021, doi: 10.47836/pjst.29.3.22.
- [4] M. A. A. Ali, A. M. A. EL Shaikh, y S. F. Babiker, "Controlling the CNC machine using microcontroller to manufacture PCB", en *2016 Conference of Basic Sciences and Engineering Studies (SGCAC)*, feb. 2016, pp. 116–120. doi: 10.1109/SGCAC.2016.7458015.
- [5] N. Sathyakumar, K. Prasath Balaji, R. Ganapathi, y S. R. Pandian, "A Build-Your-Own Three Axis CNC PCB Milling Machine", *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, núm. 11, Part 3, pp. 24404–24413, ene. 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.236.
- [6] Z. Tahir, N. A. Abu, S. Sahib, y N. Suryana Herman, "CNC PCB drilling machine using Novel Natural Approach to Euclidean TSP", en *2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology*, jul. 2010, pp. 481–485. doi: 10.1109/ICCSIT.2010.5563910.
- [7] J. M. Berbesi, K. Saumeth, y F. Pinilla, "Parallel control firmware for CNC milling machine based in Arduino", en *2017 12th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*, oct. 2017, pp. 319–322. doi: 10.1109/IMPACT.2017.8255919.
- [8] R. Choudhary, Sambhav, S. D. Titus, P. Akshaya, J. A. Mathew, y N. Balaji, "CNC PCB milling and wood engraving machine", en *2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon)*, ago. 2017, pp. 1301–1306. doi: 10.1109/SmartTechCon.2017.8358577.
- [9] C.-Y. Tsai y C.-C. Chiu, "A case-based reasoning system for PCB principal process parameter identification", *Expert Systems with Applications*, vol. 32, núm. 4, pp. 1183–1193, may 2007, doi: 10.1016/j.eswa.2006.02.014.
- [10] S. Bhunia y M. Tehranipoor, "Chapter 2 - A Quick Overview of Electronic Hardware", en *Hardware Security*, S. Bhunia y M. Tehranipoor, Eds., Morgan Kaufmann, 2019, pp. 23–45. doi: 10.1016/B978-0-12-812477-2.00007-1.
- [11] J. C. A. Sousa, T. M. Soares, J. M. Tabora, y H. G. Lott, "Design of a Controller for Supercapacitor's Bidirectional High-Gain Interleaved Converter", *Energies*, vol. 18, núm. 10, Art. núm. 10, ene. 2025, doi: 10.3390/en18102605.
- [12] "H. Torres-Ortega, Guía de diseño de PCB con EAGLE. Herramientas Tecnológicas Profesionales, 2014. [Online]. Available: https://hetpro-store.com/images/Tutoriales/pcb_eagle/hetpro_tutorial_pcb_eagle.pdf".
- [13] R. Shashikanth, "Wet PCB Etching Using Acidic & Alkaline", *Sierra Circuits*. Consultado: el 7 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.protoexpress.com/blog/wet-pcb-etching-acidic-alkaline-methods/>
- [14] "SainSmart | Desktop CNC, 3D Printing & DIY Tools | Power to the Makers", *SainSmart.com*. Consultado: el 7 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.sainsmart.com/>