

Manufactura de tarjetas de circuito impreso utilizando tecnología de control numérico por computadora Printed circuit board manufacturing using computer numerical control technology

G. H. López-Mera ^{a,*}, A. A. Luna-Gómez ^a, R. D. Cruz-Morales ^a, D. Tinoco-Varela ^a

^aDepartamento de Ingeniería, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán - UNAM, 54714, Cuautitlán Izcalli, Edo. de México, México.

Resumen

La necesidad de fabricar un circuito prototipo surge con frecuencia en electrónica. Este documento presenta una metodología para la manufactura de placas de circuito impreso (PCB) mediante fresado de Control Numérico por Computadora (CNC) utilizando un Router CNC. Se describe el proceso completo, desde el diseño del layout en Eagle, la generación de código G con PCB-Gcode, hasta la ejecución mediante el software Candle. Se realizaron pruebas experimentales con herramientas tipo V de distintos ángulos, profundidades de grabado y velocidades de avance. Se validó la fabricación de pistas desde 0.15 mm, incluyendo pruebas con componentes SMD. La metodología propuesta permitió reducir el tiempo real de grabado, con una mejora significativa en la calidad de las pistas. Estos resultados demuestran que es viable implementar esta técnica como alternativa accesible y precisa para la fabricación de prototipos electrónicos en entornos educativos y de bajo presupuesto.

Palabras Clave: PCB, Router CNC, Manufactura, Eagle, Candle.

Abstract

The fabrication of prototype circuits is a recurrent necessity in the field of electronics. This paper presents a methodology for the manufacturing of printed circuit boards (PCBs) through Computer Numerical Control (CNC) milling, employing a CNC router. The complete process is detailed, encompassing layout design using Eagle, G-code generation with PCB-Gcode, and execution via the Candle software. Experimental trials were conducted using V-shaped milling tools with varying angles, engraving depths, and feed rates. Track widths as narrow as 0.15 mm were successfully fabricated and validated, including tests with surface-mount devices (SMD). The proposed methodology significantly reduced the actual engraving time while enhancing the quality of the tracks. These findings demonstrate the feasibility of implementing this technique as a cost-effective and accurate alternative for electronic prototyping, particularly in educational and low-budget environments

Keywords: PCB, CNC Router, Manufacturing, Eagle, Candle.

1. Introducción

En el ámbito educativo, el proceso de manufactura de las placas de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés), se realiza comúnmente mediante la técnica de ataque químico, empleada por su simplicidad y bajo costo. Esta metodología permite a los estudiantes elaborar prototipos funcionales de PCB en asignaturas asociadas con el área de ingeniería eléctrica y electrónica. Sin embargo, su aplicación presenta diversas desventajas, tanto técnicas como medioambientales (Ocampo y de Jesús Deras, 2014):

- Dificultad de manufacturar pistas delgadas (menores a 2 mm), lo que puede provocar fallos de continuidad e impide el uso de dispositivos de montaje superficial.
- Es una metodología que usa sustancias químicas peligrosas que son nocivas para la salud y el medioambiente, lo que compromete la sostenibilidad del proceso.

Como alternativa, surge el uso de las máquinas de Control Numérico por Computadora (CNC) en la fabricación de PCB. Un sistema CNC es capaz de controlar automáticamente los movimientos de una herramienta de corte mediante comandos

*Autor para correspondencia: gonzalosieben@gmail.com

Correo electrónico: gonzalosieben@gmail.com (Gonzalo Hedain López-Mera), alma.luna@cuautitlan.unam.mx (Alma Alejandra Luna-Gómez), rd-cruz@comunidad.unam.mx (Raúl Dalí Cruz-Morales), dativa19@hotmail.com (David Tinoco-Varela).

Historial del manuscrito: recibido el 05/07/2025, última versión-revisada recibida el 18/12/2025, aceptado el 17/12/2025, publicado el 25/03/2026. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial.15455>



programados, lo que permite realizar operaciones con alta precisión y repetibilidad (Recamlaser, 2018). A diferencia del proceso manual el CNC automatiza el posicionamiento de los ejes y permite ejecutar trayectorias complejas de forma eficiente. Entre sus ventajas destacan (Moreno, 2023):

- Incremento en la producción y calidad de las piezas sin requerir de personal especializado.
- Mayor seguridad en el manejo indirecto de productos peligrosos.
- Aumento en precisión y reducción de errores humanos.
- Reducción de residuos, de costos y tiempos de fabricación.

Diferentes trabajos han estudiado la implementación de este tipo de tecnología CNC para la fabricación de PCB. Por mencionar trabajos como Madekar *et al.* (2016) y Prianto *et al.* (2025) reportan el diseño de máquinas mini CNC de bajo costo enfocadas en la fabricación de PCB, asegurando una manufactura de alta precisión y orientadas como herramientas de aprendizaje. Asimismo, en Ávila *et al.* (2024) se detallan experiencias prácticas con equipos caseros, documentando los resultados obtenidos del proceso propuesto, el cual es una combinación de procesos mecánicos y químicos. Los autores identifican los desafíos que esta tecnología presenta como la necesidad de modificar el diseño de la PCB con el fin de adaptarse a las limitaciones físicas de las herramientas.

Por otro lado, existen propuestas de la tecnología CNC mediante el uso de grabado por láser. En Sharma *et al.* (2023) se presenta el desarrollo de una máquina Router CNC de dos ejes equipado con rayo láser de CO_2 de 100 W y escaner galvo para la manufactura de PCB. Aquí la metodología presentada consiste en remover la capa de cobre y rastrear las líneas de PCB en un solo paso. Si bien el método propuesto se propone como una opción ecológica, el proceso requiere del software Altium Designer para el diseño de la PCB, el cual no es de código abierto, lo que puede limitar su adopción en entornos educativos. Un enfoque similar es el presentado en Durillo *et al.* (2018), donde el software Altium Designer y GerbView son utilizados para el diseño de PCB y el convertidor de archivos gerber a archivos tipo .svg, respectivamente. Para la manufactura de la PCB el archivo .svg es cargado al software LaserWeb, el cual se encarga de controlar la cortadora láser tipo EleksMaker Laser A3 Pro de 2.5 W.

En cuanto al desarrollo de máquinas capaces de producir PCB mediante fresado, el trabajo de Dhinesh *et al.* (2021) presenta un proceso que diseña la PCB en el software Eagle CAD, el código generado se convierte usando JavaScript y el archivo se carga al software ESTLCAM que controla la CNC. El trabajo muestra la capacidad de fresar líneas de 0.3 mm de ancho y 0.46 mm de profundidad. Otro ejemplo relevante, es el trabajo de Ocampo y de Jesús Deras (2014) el cual utiliza Eagle para el diseño de PCB con su correspondiente archivo gerber y el mecanizado se realiza en una máquina CNC Sherline. Entre la etapa del diseño y el mecanizado se hace uso de un asistente de placas de circuito impreso maquinadas, que consiste en tomar el archivo gerber y convertirlo a código G mediante el software pcb2gcode y de forma posterior producir un nuevo código G

utilizando el software autoleveller que considera las diferentes alturas de la placa.

Además del interés académico, la fabricación local de PCB adquiere relevancia estratégica en el contexto actual. Como lo hace notar Papandrew (2025), existe una creciente presión en la cadena global de suministro de PCB, especialmente en Estados Unidos, donde se revela una problemática que también afecta a países como México, esto es, una dependencia evidente de la manufactura extranjera, principalmente de China. Esto ha provocado un aumento de costos, tiempo de entrega prolongados y una limitada capacidad de producción local. Esta situación pone en riesgo la competitividad y la autonomía tecnológica de sectores estratégicos.

Ante este panorama, el desarrollo de métodos alternativos y accesibles para la fabricación de PCB se vuelve un área de oportunidad significativa. El presente trabajo se justifica en la necesidad de explorar la viabilidad de manufactura de PCB mediante una máquina Router CNC 3018 y software libre, proponiendo una solución de bajo costo y adaptable a instituciones educativas y proyectos de innovación local. Además, se busca contribuir a una mayor independencia tecnológica en el país, proponer un método ecológico y sostenible que reduzca la dependencia de procesos contaminantes.

En este trabajo, la Sección 2 presenta una descripción general del software empleado en el proceso de diseño de PCB. La Sección 3 expone las características técnicas de la máquina CNC utilizada en la fabricación, así como los tipos de herramientas de grabado y taladrado seleccionadas. En la Sección 4 se detalla la metodología de manufactura, describiendo de manera integral las etapas que permiten transformar un diseño electrónico en una PCB funcional. La Sección 5 aborda el desarrollo experimental orientado a la determinación de los parámetros de fabricación. Los resultados obtenidos se reportan en la Sección 6, y finalmente, en la Sección 7 se presentan las conclusiones generales del estudio.

2. Descripción del software del sistema

El proceso de manufactura de PCB mediante tecnología CNC requiere la integración de diversas herramientas de software que abarcan desde el diseño esquemático hasta la ejecución del mecanizado. En esta sección se describen los programas utilizados en las distintas etapas del flujo de manufactura de PCB, destacando sus características más relevantes.

2.1. Eagle

Para la conexión del diagrama esquemático y layout de la PCB se elige utilizar el software de diseño de gráficos electrónico Eagle. La disponibilidad de la licencia del software para la comunidad académica justifica su elección, además, permite la exportación directa de código G del diseño de la PCB necesario para la máquina CNC. Eagle cuenta con un amplio contenido de bibliotecas incluidas y existen muchas más que pueden añadirse, creadas por usuarios de la comunidad de PCB de código abierto que se encuentran disponibles en línea.

2.2. PCB-Gcode

El software PCB-Gcode se utilizará para la generación de código G que indique a la máquina fresadora CNC la trayectoria

de herramienta. Este software es un complemento para Eagle, el cual es un Programa de Lenguaje de Usuario (ULP, por sus siglas en inglés), que será el software de Fabricación Asistida por Computadora (CAM, por sus siglas en inglés) y que convertirá el archivo .brd en un archivo de código G. La configuración del software PCB-Gcode permite realizar ajustes al mecanizado de las trayectorias de herramienta para la PCB, como el tipo de herramienta, las velocidades de avance, la profundidad de perforación, entre otras.

2.3. Candle

Para el control de la máquina CNC se emplea el software de código abierto Candle, el cual destaca por su interfaz intuitiva y por la visualización gráfica en tiempo real de la trayectoria de la herramienta, lo que permite identificar y corregir posibles errores antes de iniciar el proceso de fresado. Este software es compatible con máquinas CNC que operan con el firmware GRBL, ampliamente utilizado en sistemas de control de código abierto.

Entre sus principales funcionalidades, Candle permite la visualización del código G, el control de la máquina mediante comandos de consola, botones o teclado numérico, y la generación de un mapa de alturas mediante una rutina de sondeo. Esta rutina registra las variaciones en la altura de la superficie de trabajo con respecto al eje Z, lo que permite compensar desniveles o irregularidades en el material base. Durante el fresado, el software ajusta dinámicamente la altura de la herramienta según el mapa de alturas, garantizando una profundidad de corte constante a lo largo de todo el diseño. Esta función resulta especialmente útil en el grabado de pistas de PCB, donde incluso pequeñas variaciones en la altura pueden ocasionar cortes incompletos o daños en la placa.

3. Descripción de la máquina CNC

Para la manufactura de la PCB se hace uso de una máquina CNC capaz de ejecutar tareas de fresado y taladrado con alta precisión. En esta sección se describe el Router CNC 3018 ampliamente utilizado en entornos educativos y en la comunidad Maker (Aqua, 2021) por su versatilidad para el prototipado rápido, el cual es un equipo compacto, de bajo costo y de fácil configuración.

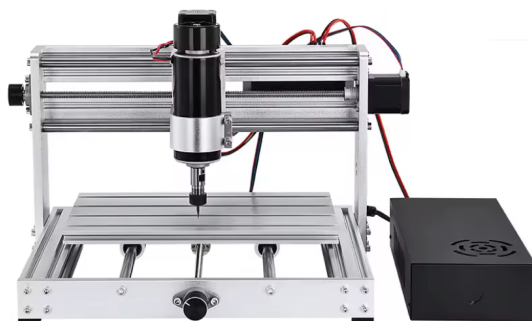


Figura 1: Máquina Router CNC 3018.

3.1. Parámetros electromecánicos

El máquina Router CNC 3018 para la manufactura de PCB se puede ver en la Figura 1. El sistema consta de tres motores

paso a paso para el movimiento a lo largo de los ejes X, Y y Z, un marco de aluminio, un motor de husillo, husillos para la transmisión de potencia, tarjeta de control y otros accesorios relacionados. Las especificaciones de la máquina están en la Tabla 1.

Tabla 1: Características de la máquina Router CNC 3018.

Característica	Parámetro
Tamaño del marco	400 × 300 × 240 mm
Área de grabado	300 × 180 × 40 mm
Motor paso a paso	NEMA 42, 1.68 A , 0.55 N/m
Motor del husillo	Husillo de 500 W, 48 V
Velocidad del husillo	11,000 rpm
Fuente de alimentación	48 V, 10.4 A

3.2. Herramental

Para el maquinado de PCB, se acoplan brocas de fresado y taladrado mediante un mandril de precisión tipo ER11. Para las operaciones de fresado se utilizan brocas en forma de V de un solo filo, con ángulos de 20°, 30° y 60°, y un ancho de punta de 0.1 mm, ver Figura 2. Por otro lado, los agujeros pasantes se realizan con mini brocas de doble filo, cuyos diámetros oscilan entre 0.1 mm y 3.0 mm. Todas las herramientas de corte presentan un vástago de 1/8 de pulgada y están fabricadas en carburo de tungsteno, material que proporciona alta durabilidad y precisión dimensional durante el mecanizado.

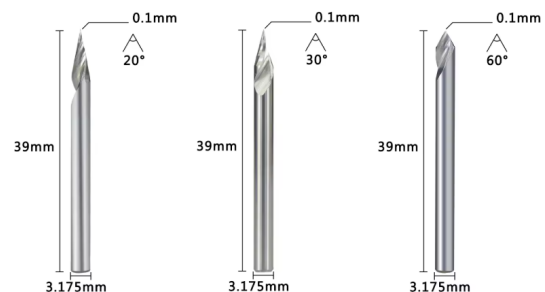


Figura 2: Brocas de fresado tipo V.

4. Metodología para la manufactura de PCB

El proceso de manufactura de PCB comienza con su esquemático en el software *Eagle*, a partir del cual se genera un archivo con extensión .brd. Este archivo se procesa con el software PCB-Gcode, el cual convierte el diseño en archivos de código G que contienen las instrucciones necesarias para la operación de la máquina CNC. Posteriormente, dichos archivos se cargan en el software de control *Candle*, encargado de enviar las órdenes de fresado y taladrado a la máquina *Router CNC 3018*.

El flujo general de este proceso se ve en la Figura 3, donde los tres primeros bloques corresponden al entorno de software y el último al proceso físico de fabricación de PCB. A continuación, se detalla esta metodología.

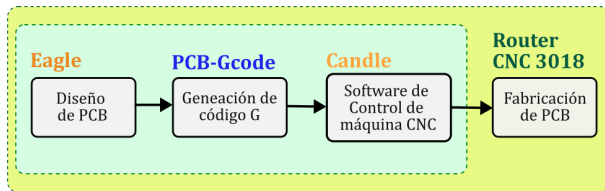


Figura 3: Flujo metodológico en la fabricación de PCB.

4.1. Diseño del Layout de PCB

El diseño del layout inicia con la elaboración del esquema eléctrico del circuito, el cual debe estar previamente verificado. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de un circuito diseñado que incluye un Arduino Uno, una pantalla LED de 16x2, shields de expansión y resistencias.

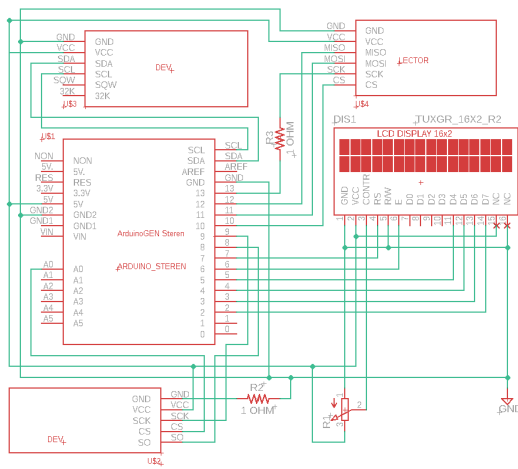


Figura 4: Esquema eléctrico de circuito prototipo visualizado en Schematic de Eagle.

A partir del esquema funcional, se utiliza el comando *Generate/switch to board* para transferir el diseño al módulo Board de Eagle, donde se realiza la disposición física de los componentes sobre la PCB. Una vez colocados, las conexiones entre los componentes pueden realizarse automáticamente mediante la herramienta *Autorouter* o manualmente, según las preferencias del diseñador. En este trabajo, se optó por un diseño de una sola capa. En caso de que alguna conexión quede en una segunda capa, se realiza un puente físico utilizando un conductor ideal.

Con los componentes posicionados y conectados, es posible personalizar diversos parámetros del ruteado, como el estilo de curvatura, el ancho y el espaciado entre pistas. Estas configuraciones dependen tanto de la experiencia del diseñador como de las normas aplicables. En este proyecto, se empleó un ancho de traza de 1 mm. Asimismo, es importante incluir una terminal de tierra (GND). Esto se logra generando un polígono que delimite el contorno de la PCB mediante la herramienta *Polygon* y asignando el nombre "GND" a la señal.

Para asegurar un aislamiento adecuado entre pistas, se utiliza la herramienta *info* para modificar el valor de aislamiento (*Isolate*) del polígono GND. En este caso, se empleó un valor de 0.5 mm, conforme a la norma IPC-2221, que establece esta separación mínima para pistas sujetas a tensiones superiores

a 100 V en productos electrónicos de alta confiabilidad o uso especializado.

Una vez finalizado el diseño, se ejecuta la herramienta de Comprobación de Reglas de Diseño (DRC, por sus siglas en inglés) para identificar posibles errores. En la Figura 5 se muestra el layout final, el cual es un archivo con extensión .brd.

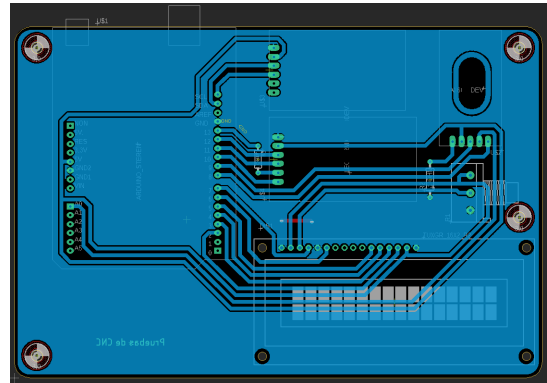


Figura 5: Layout de circuito prototipo visualizado en Board de Eagle.

4.2. Generación de código G a partir de un archivo de Eagle

Esta sección describe el proceso de conversión de un archivo generado en Eagle a un archivo de código G, siguiendo el procedimiento y parámetros documentados por Richard (2019), que sirven como referencia y punto de comparación. Únicamente se consideran los parámetros disponibles en la versión actual de PCB-Gcode, configurados para una máquina CNC Shapeoko 2 con husillo de 30,000 rpm y una fresa de grabado de 20° con punta de 0.2 mm.

Una vez cargado el script ULP en Eagle, se accede a la ventana de configuración de PCB-Gcode desde el módulo Board haciendo clic en el icono *ULP* del menú superior. Al abrirse la ventana emergente, se selecciona el archivo *pcb-gcode-setup*, con lo cual se despliega la interfaz de configuración mostrada en la Figura 6.

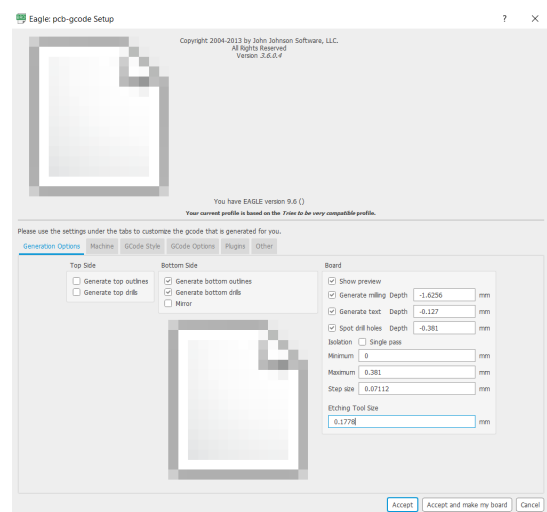


Figura 6: Ventana de inicio de PCB-Gcode.

4.2.1. Configuración de Parámetros de Generación

En la pestaña *Generation Options*, se encuentran tres secciones de configuración:

- **Top Side:** No se selecciona ninguna opción, ya que el diseño es de una sola cara.
- **Bottom Side:** Se activan las opciones:
 - **Generate bottom outlines y**
 - **Generate bottom drills.**
- **Board:** Las opciones disponibles incluyen:
 - **Show preview:** Muestra una vista previa tras la configuración.
 - **Generate milling:** Permite generar el contorno de la PCB. Esta opción realiza el corte en una sola pasada, lo cual somete la herramienta a gran esfuerzo mecánico. Se recomienda usarla únicamente si no se cuenta con otra forma de cortar el contorno. Valor sugerido: -1.6256 mm.
 - **Generate text:** Permite grabar texto en la PCB, siempre que esté en la capa 46 (*Milling*) y use fuente vectorial. Valor sugerido: -0.127 mm.
 - **Spot drill holes:** Marca los puntos de perforación posterior al fresado de las pistas. Valor sugerido: -0.381 mm.
 - **Isolation:** Controla la separación entre las pistas:
 - **Single pass:** Dibuja un solo contorno por traza.
 - **Minimum:** Valor mínimo de aislamiento. Valor sugerido: 0 mm (asegura al menos una pasada por pista).
 - **Maximum:** Aislamiento máximo. Valor sugerido: 0.381 mm.
 - **Step size:** Distancia entre pasadas. Valor sugerido: 0.07112 mm (40 % del diámetro de la punta de la herramienta).

4.2.2. Configuración de Parámetros de Maquinado

En la pestaña *Machine*, se definen las velocidades de corte y los movimientos del eje Z, ver Figura 7. Las configuraciones sugeridas para el eje Z son:

- **Z High:** Altura de seguridad para movimientos sin corte. Valor sugerido: 12.7 mm.
- **Z Up:** Altura segura entre desplazamientos. Valor sugerido: 2.54 mm.
- **Z Down:** Profundidad de fresado para aislamiento. Valor sugerido: -0.1778 mm.
- **Drill Depth:** Profundidad de perforación. Valor sugerido: -1.7018 mm.
- **Drill Dwell:** Tiempo de espera antes de retirar la broca. Valor sugerido: 1 s.

Para el cambio de herramienta (**Tool Change**), se sugieren los siguientes valores:

- **Position X:** 0 mm.
- **Position Y:** 0 mm.
- **Position Z:** 25.4 mm.

En la sección **Units**, se recomienda seleccionar **Millimeters** para facilitar la lectura del código G.

En la sección **Spindle**, la opción **Spin Up Time** define el tiempo requerido para que el husillo alcance su velocidad máxima. Valor sugerido: 3 s.

En **Feed Rates**, se configuran las velocidades de avance sugeridas:

- Movimiento en plano **XY**: 508 mm/min
- Movimiento en eje **Z**: 254 mm/min

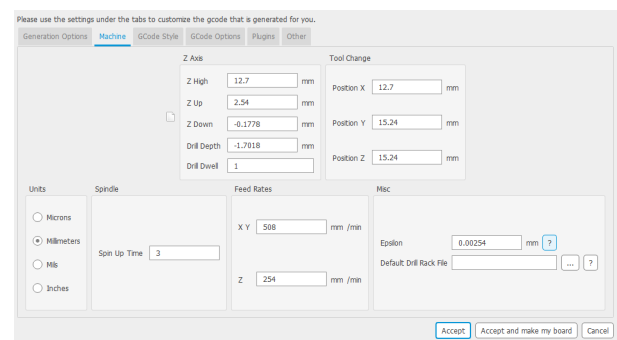


Figura 7: Pestaña Machine de PCB-Gcode.

4.2.3. Configuración Final y Generación del Código

Debido a que *PCB-Gcode* incluye comentarios extensos en los archivos de salida, lo que puede generar errores al cargar el código G en la CNC, en la pestaña **Gcode Options** se recomienda activar todas las opciones de **NC File Comments**.

En la sección **Other Options**, se sugiere activar:

- **Use user gcode.**
- **Debug flag.**
- **Use simple drill code.**

El formato de salida debe permanecer como *N %05d* (valor por defecto).

Finalmente, en la pestaña **Gcode Style**, se elige el estilo de salida del código G. Se recomienda utilizar:

- **generic.pp** (ampliamente compatible), o
- **mach.pp** (compatible con sistemas basados en Windows).

4.3. Técnica utilizada en la fabricación

La fabricación de la PCB se realizó utilizando el software Candle. Los archivos empleados se cargan de forma individual; en este trabajo se utilizaron archivos con extensiones .etch (grabado de pistas y pads) y .drill (taladrado de orificios). A continuación, se describen las etapas del proceso de fabricación.

4.3.1. Preparación del material

Previo al proceso de grabado y taladrado, es necesario preparar la placa fenólica. Esta se fija sobre una base de MDF de al menos 6 mm de espesor mediante cinta masking azul y pegamento blanco. Esta base adicional permite garantizar una correcta profundidad durante el proceso de taladrado. Una vez que el adhesivo ha curado, el conjunto se posiciona sobre la cama de trabajo de la máquina CNC, asegurándose de que el husillo pueda desplazarse libremente, como se muestra en la Figura 8.

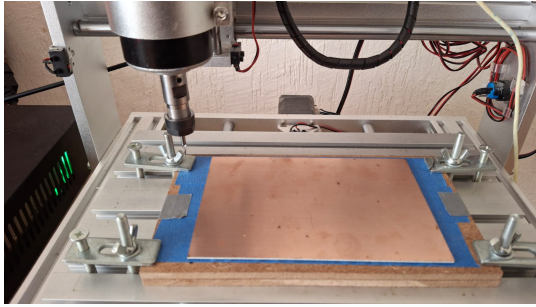


Figura 8: Placa fenólica de fibra de vidrio sujeta al área de trabajo de la máquina CNC.

4.3.2. Ejecución del archivo de grabado

Desde el software Candle, se accede al directorio donde se encuentran los archivos de código G y se abre el archivo de grabado correspondiente (nombre-archivo.bot.etch). Este archivo contiene las trayectorias para la herramienta de grabado, como se observa en la Figura 9.

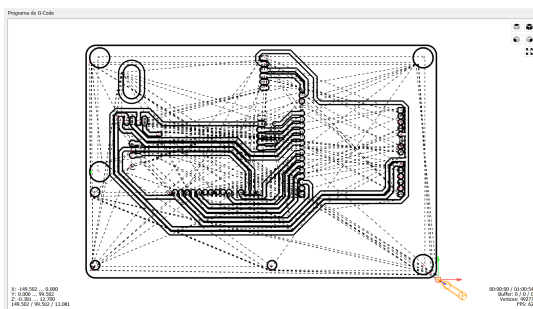


Figura 9: Archivo .etch cargado en Candle.

El punto de origen del grabado se localiza en la esquina inferior izquierda, por lo tanto, la broca de grabado debe posicionarse de forma real en dicha ubicación y establecer las coordenadas X, Y y Z en cero. Una vez definido el punto de origen, se procede a generar un mapa de alturas para compensar irregularidades superficiales de la placa.

Este mapa se genera conectando dos cables al puerto A5 de la máquina CNC: uno a la broca de grabado y otro a la superficie conductora de la placa, como se ve en la Figura 10.

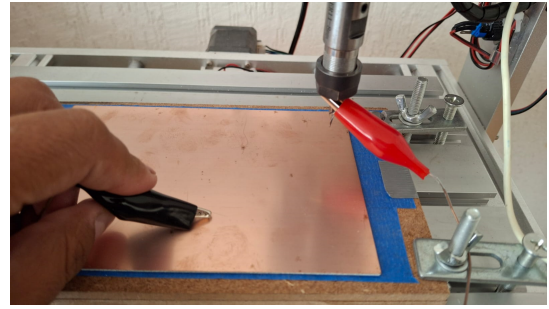


Figura 10: Prueba de altura utilizando sonda táctil.

Cuando la broca entra en contacto con la placa, el circuito se cierra, permitiendo al sistema registrar la altura exacta del punto muestreado. Los pasos para la configuración del mapa de alturas en Candle son los siguientes:

- Abrir el archivo .etch y seleccionar la opción *Mapa de alturas*.
- Activar la opción *Crear*.
- Definir los bordes de trabajo de acuerdo con las dimensiones del diseño.
- Establecer la resolución de la grilla. En este caso, se utilizó una grilla de 9 puntos en X y 6 en Y, equivalente a una resolución de aproximadamente 15 mm entre puntos. Un mayor número de puntos incrementa la precisión, pero también el tiempo de muestreo. El proceso tomó 8 minutos y 35 segundos, ver Figura 11.
- Guardar el archivo generado y salir del *Modo de edición*.
- Desconectar la sonda táctil.
- Iniciar el proceso de grabado mediante el botón *Enviar*.

El proceso de grabado se inicia automáticamente, y la herramienta sigue las trayectorias definidas en el archivo .etch. El tiempo total de grabado, utilizando los parámetros sugeridos por Richard (2019), fue de 1 hora, 24 minutos y 24 segundos para el circuito propuesto.

4.3.3. Ejecución del archivo de taladrado

Finalizado el grabado, se carga el archivo correspondiente al taladrado (nombre-archivo.bot.drill) utilizando el mismo mapa de alturas y sin modificar el punto de origen previamente definido. Se sustituye la herramienta de grabado por una broca de taladrado del diámetro correspondiente. El proceso inicia al presionar *Enviar*.

El tiempo requerido para el taladrado depende principalmente de la cantidad de cambios de herramienta que el usuario deba realizar, según los diámetros especificados en el código G. Una vez concluido el proceso de fabricación, se recomienda limpiar cuidadosamente la placa para eliminar residuos de material sobrante.

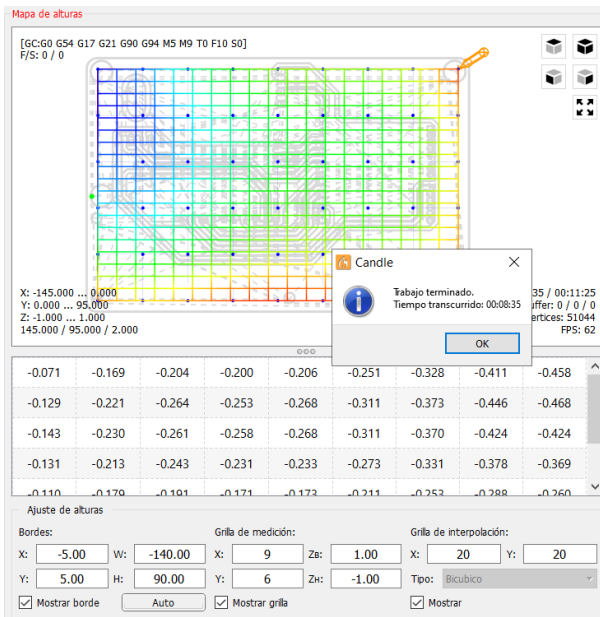


Figura 11: Generación del mapa de alturas.

5. Ajuste de parámetros

Con el fin de establecer una metodología eficiente y reproducible para la manufactura de PCB utilizando una máquina Router CNC 3018, se llevó a cabo un proceso de ajuste de parámetros críticos del grabado. Este análisis incluyó la evaluación comparativa de diferentes herramientas de corte, profundidades de grabado, velocidades de operación y anchos de pista, así como la compatibilidad de los resultados con Tecnologías de Montaje Superficial (SMT, por sus siglas en inglés). Las pruebas fueron diseñadas para identificar las combinaciones de condiciones que ofrecieran el mejor desempeño en términos de precisión dimensional, calidad del acabado y viabilidad en la fabricación de prototipos funcionales.

5.1. Selección de herramienta de grabado

Partiendo de lo reportado en el estado del arte, donde se sugiere el uso de brocas tipo V de 20° para el grabado de PCB, se realizó una evaluación comparativa utilizando herramientas de corte tipo V con ángulos de 60°, 30° y 20°. En las pruebas, la herramienta de 60° mostró un mejor rendimiento, generando menor cantidad de rebabas, como se observa en la Figura 12.

El acercamiento del grabado de las pistas de la Figura 13, muestra con mayor detalle las rebabas de las pistas, y el desgaste que tiene cada herramienta, mostrando que la herramienta de 60° posee un menor desgaste tras el uso. El desgaste de las puntas se atribuye tanto a la generación del mapa de alturas como al esfuerzo cortante durante el desplazamiento transversal en el plano XY. Como resultado, se seleccionaron las brocas de 60° y 30° para los siguientes ensayos.

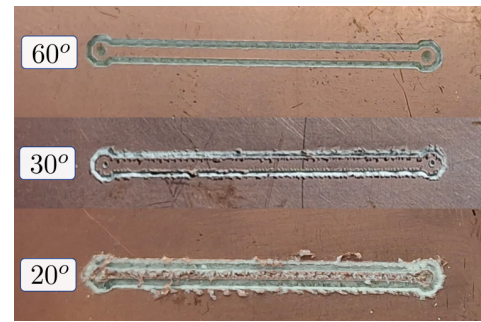
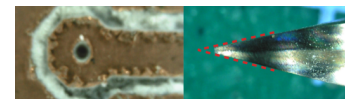


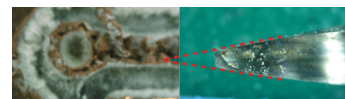
Figura 12: Pistas grabadas con diferentes herramientas tipo V.



(a) Pista grabada con Broca de 60°.



(b) Pista grabada con Broca de 30°.



(c) Pista grabada con Broca de 20°.

Figura 13: Grabado de pistas con brocas tipo V.

5.2. Profundidad de grabado

Se analizaron profundidades de grabado entre -0.1 y -0.2 mm, considerando el espesor de la capa de cobre ($\approx 35 \mu\text{m}$) sobre una placa fenólica de 1.6 mm. Los resultados de dichas pruebas se muestran en la Figura 14. La profundidad de grabado igual a -0.175 mm, usando la broca de 60°, produjo un ancho de pista de aislamiento de 0.5 mm con mínimas rebabas.

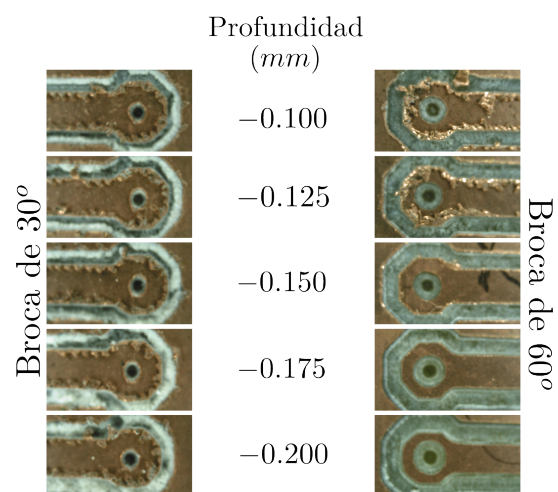


Figura 14: Pistas grabadas con diferentes profundidades.

5.3. Marcado previo al taladrado

Para asegurar la precisión en el taladrado de orificios pasantes, se realizaron pruebas en la generación de marcas previas al

taladrado (punteado) con una herramienta tipo V de 60° , en un rango de profundidad de -0.1 a -0.5 mm, como se puede ver en la Figura 15. La figura presenta los ensayos de las marcas, la punta de la broca de 0.8 mm de diámetro y un acercamiento de la broca y la marca con profundidad de -0.3 mm. El valor seleccionado es el de -0.3 mm, para un guiado efectivo de las brocas y así evitar desplazamientos indeseados.

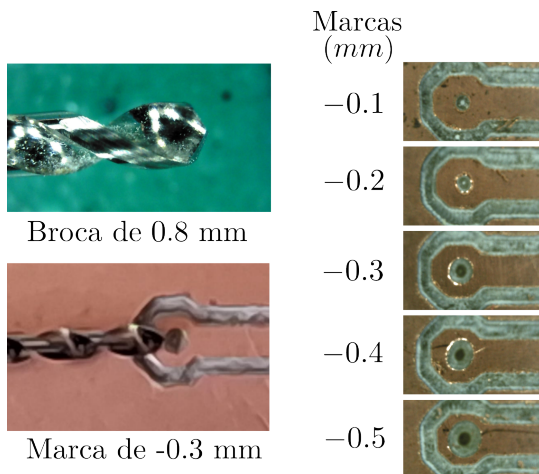


Figura 15: Pistas grabadas con diferentes profundidades.

5.4. Velocidad de grabado

Se realizaron pruebas de velocidades de grabado, ya que estas definen la velocidad del movimiento del husillo y a su vez el tiempo de grabado. La Figura 16 presenta una gráfica que compara distintas velocidades de grabado, que varían entre 25 y 375 mm/min, con los tiempos de fabricación estimados y reales.

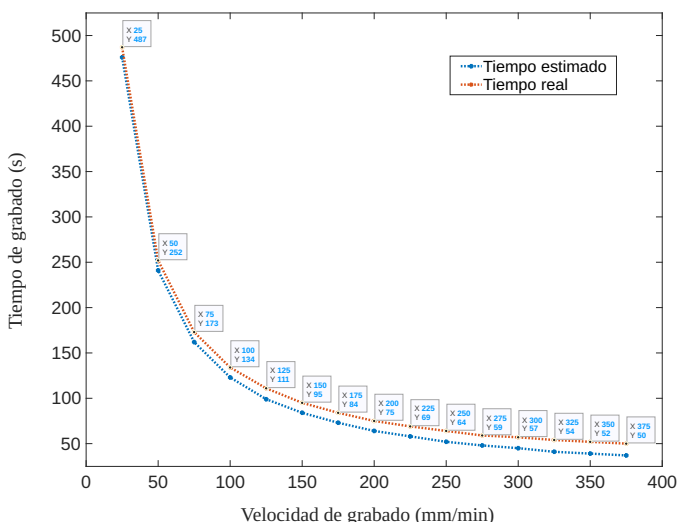


Figura 16: Curva característica entre la velocidad de corte y el tiempo de grabado.

En los resultados del grabado de las pistas, se observó que las velocidades extremas del rango de muestreo causaron mayores rebabas en los bordes. En cambio, entre las velocidades de 175 y 275 mm/min, las rebabas fueron mínimas y uniformes.

Con relación al tiempo real y el tiempo estimado, la gráfica muestra un comportamiento similar, el cual no es lineal. Además, la reducción del tiempo de fabricación al aumentar la

velocidad deja de ser significativa a partir de los 275 mm/min. Por esta razón, se considera el valor de 250 mm/min, para el uso de la herramienta tipo V de 60° .

5.5. Ancho de pista y compatibilidad con SMD

Se realizó una prueba de una serie de pistas de cobre de igual trayectoria con el ancho ascendente. La trayectoria de la pista más delgada se repitió tres veces con fines de comprobar su fiabilidad, determinar repetibilidad en el acabado y conductividad eléctrica, obteniendo resultados satisfactorios.

La fabricación de las pistas y un acercamiento parcial de las mismas se puede ver en la Figura 17. Las dimensiones indicadas corresponden a las establecidas en el software CAD y fueron verificadas con un calibrador Vernier de marca Starrett con precisión de dos decimales. El rango de prueba abarca de 0.15 a 1.016 mm, siendo este último valor seleccionado porque corresponde al rango típico de los componentes electrónicos de tecnología de montaje por orificio pasante, que va de 0.8 mm a 1 mm.

Grosor de pista conductora (mm)

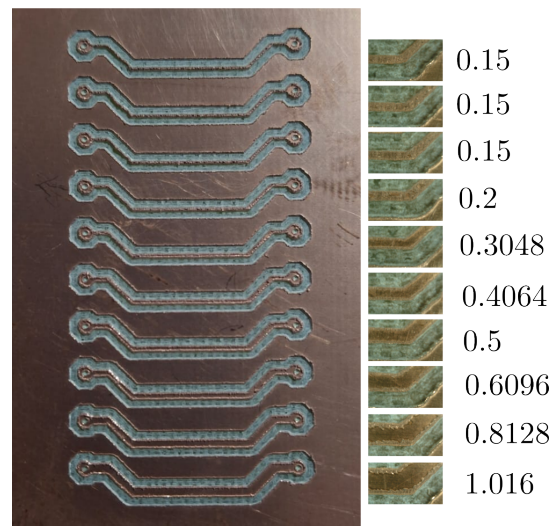
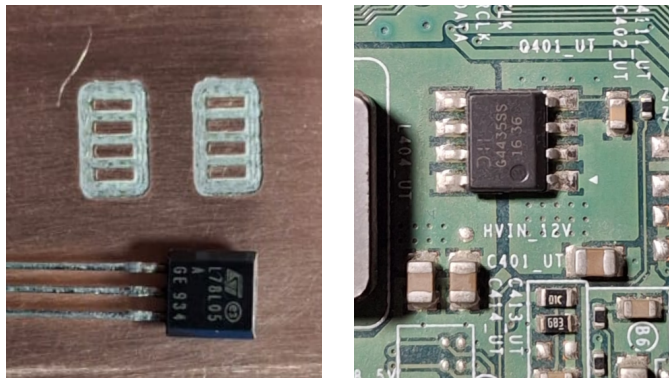


Figura 17: Pistas grabadas de anchos distintos.

Con los parámetros establecidos para el grabado de las pistas en la PCB, se realizó una prueba para evaluar la aplicabilidad de esta metodología en la tecnología de montaje superficial y así abrir la posibilidad de usar componentes SMD en diseños electrónicos.

En la Figura 18(a) se muestra el grabado de los pads para el circuito integrado MAX1811, con encapsulado SO de 8 pines y dimensiones de 5×4 mm. En la Figura 18(b) aparece una fotografía del componente DMG4435SSS, también con encapsulado SO de 8 pines, montado en una PCB de una pantalla LED marca Samsung.

El aislamiento entre trazas se mantuvo en 0.5 mm. El regulador de voltaje 78L05 y la fotografía del componente DMG4435SSS en la Figura 18 se incluyen únicamente con fines ilustrativos y para referencia de escala visual.



(a) Grabado de pads de componente SMD. (b) Fotografía de componente DMG4435SS.

Figura 18: Tecnología de Montaje Superficial.

6. Resultados

Los parámetros ajustados para la fabricación de PCB con una máquina Router CNC 3018, usando una herramienta de corte tipo V de 60° y un husillo de 11,000 rpm, se presentan para una mejor visualización en las Figuras 19 a la 22.

La comparación entre el estado del arte en la manufactura de PCB para el circuito prototipo, utilizando los parámetros sugeridos y los parámetros ajustados en este estudio, permite justificar un proceso de fabricación aceptable y de alto rendimiento. Al emplear los parámetros sugeridos, el tiempo estimado para el grabado de las pistas fue de 01:00:54 (horas:minutos:segundos), mientras que el tiempo real registrado fue de 01:24:24.

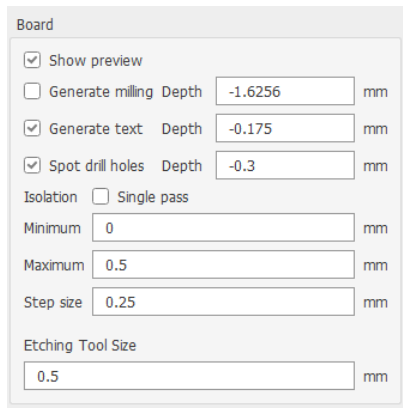


Figura 19: Parámetros óptimos para Board.

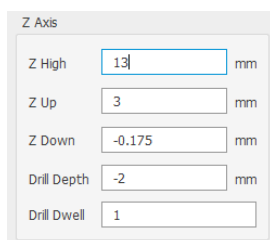


Figura 20: Parámetros óptimos para Z axis.

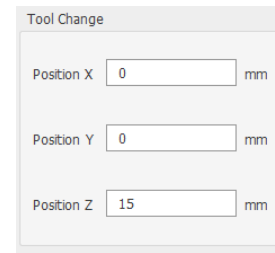


Figura 21: Parámetros óptimos para Tool Change.

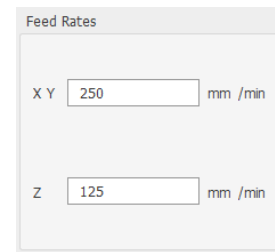


Figura 22: Parámetros óptimos para Feed Rates.

En cuanto a la calidad de las trazas, la Figura 23 presenta imágenes con acercamientos en diferentes puntos de la PCB obtenida. Aunque tanto los pads como las pistas muestran defectos en forma y trayectoria, no se detectó pérdida de continuidad entre terminales.

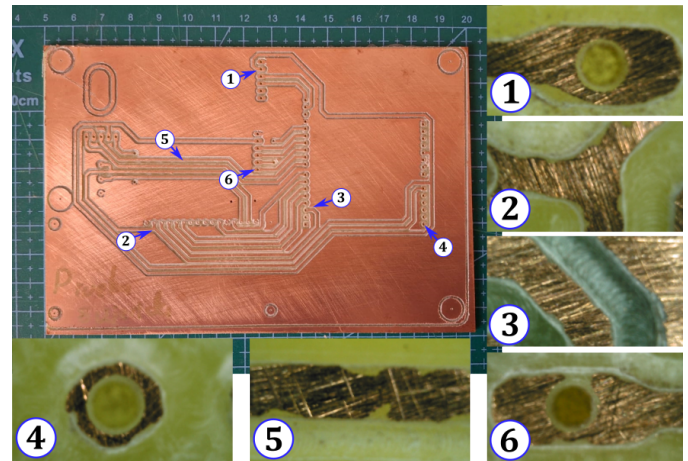


Figura 23: PCB fabricada con parámetros sugeridos.

Por otro lado, al realizar el grabado de las pistas con los parámetros ajustados, el tiempo estimado fue de 00:42:45, mientras que el tiempo real registrado fue de 00:54:25.

Además, la calidad de las trazas mejoró notablemente en cuanto a forma y trayectoria, como se puede observar en la Figura 24, donde se muestran acercamientos de los mismos puntos de la PCB presentados en la Figura 23.

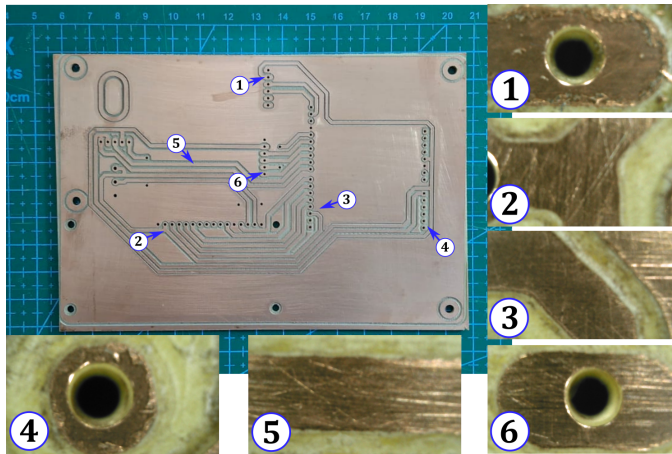


Figura 24: PCB fabricada con parámetros ajustados.

Una comparación entre los resultados presentados en este trabajo y las técnicas de manufactura de los trabajos de Ávila *et al.* (2024) y Durillo *et al.* (2018) se presentan en la Tabla 2. Aquí se resaltan las ventajas y limitaciones del enfoque propuesto.

Tabla 2: Comparativo de trabajos previos con los resultados de este trabajo.

Criterio	Este Trabajo	(Ávila et al., 2024)	(Durillo et al., 2018)
Tipo de proceso	Fresado mecánico directo sobre cobre.	Grabado láser + ataque químico.	Grabado láser con pintura protectora y posterior ataque químico.
Equipo principal	Router CNC 3018	CNC casera.	Láser EleksMaker A3 Pro 2.5 W.
Costo del equipo	~4,000-16,000 MXN	~2,500-4,000 MXN	~3,800-4,500 MXN
Precisión / Resolución	0.15-0.30 mm	0.20-0.30 mm	0.10-0.20 mm
Software empleado	Eagle, PCB-Gcode, Candle.	KiCAD, FlatCAM, FreeCAD, GRBL.	AutoCAD, Inkscape, LaserWeb, Altium Designer.
Calidad del acabado	Preciso y limpio, sin químicos.	Aceptable, puede presentar vibraciones y rebabas.	Excelente definición en plantilla y trazos; mínimas deformaciones por calor.
Seguridad / Ambiente	Sin químicos, riesgo mecánico bajo.	Uso de cloruro férrico (FeCl_3) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) es una reacción química que requiere Equipo de Protección Personal	Emisión de vapores y uso de químicos; requiere ventilación.

Todos los archivos de código G fueron generados utilizando el estilo “generic.pp”.

7. Conclusiones

Se presenta una metodología de manufactura de PCB utilizando una máquina Router CNC 3018 de fácil acceso y haciendo uso de software libre. Esto permite un proceso de prototipado rápido, de bajo costo y sostenible, representando una alternativa ambientalmente favorable al prescindir de técnicas como la de ataque químico.

Se determinaron parámetros óptimos para la fabricación de PCB empleando una herramienta de grabado tipo V con un ángulo de 60° , logrando productos de alta calidad y rendimiento.

En la fabricación de PCB de un circuito prototipo, la comparación entre el uso de parámetros ajustados y parámetros sugeridos evidenció que el tiempo real de fabricación puede reducirse hasta en un 35 %.

Se destaca que el proceso de manufactura desarrollado en este trabajo tiene la capacidad de fabricar diseños de PCB que incluyan componentes SMD.

Los resultados obtenidos demostraron la viabilidad del procedimiento para aplicaciones académicas, permitiendo diseñar PCB funcionales con alta fidelidad al diseño CAD.

Como mejoras futuras, se plantean ensayos con herramientas de grabado de distintas características para reevaluar los parámetros de aislamiento de las pistas, con el objetivo de lograr anchos menores que permitan una producción más compacta sin comprometer la calidad.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo brindado mediante los programas PAPIME PE107225 y CI2446.

Referencias

- Aquae, F. (2021). Movimiento “maker”: mucho más que “hazlo tú mismo”. Recuperado el 03 de junio de 2025, de <https://www.fundacionaquae.org/wiki/movimiento-maker-mucho-mas-que-do-it-yourself-2/#:~:text=La%20cultura%20maker%20incluye%20actividades,y%20tradicionales%20artes%20y%20artes%C3%ADas.>
- Ávila, B. Y. L., Vázquez, C. A. G., Baluja, O. P., Domínguez, L. A. Q., Cotfas, D. T., y Cotfas, P. A. (2024). Experiences in pcb manufacturing with ultralowcost and home-made cnc machine. En *2024 16th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, pp. 1–7. IEEE.
- Dhinesh, S., Kumar, K. S., Megalingam, A., y Gokulraj, A. (2021). Design and fabrication of low-cost micromachining system for prototyping printed circuit boards. *Journal of Engineering Research (Kuwait)*, 9.
- Durillo, J. C. M., Falcón, P. M., y Aranda, A. R. (2018). Low-cost laser cutter and pcb exposure. En *2018 XIII Technologies Applied to Electronics Teaching Conference (TAEE)*, pp. 1–10. IEEE.
- Madekar, K. J., Nanaware, K. R., Phadtare, P. R., y Mane, V. S. (2016). Automatic mini cnc machine for pcb drawing and drilling. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(2):1107–1108.
- Moreno, I. E. (2023). Control numérico computarizado cnc, diseño y fabricación asistidos por computadora. Recuperado el 27 de mayo de 2025, de <https://acortar.link/gfkDXX>.
- Ocampo, J. R. y de Jesús Deras, I. (2014). Aplicación integrada para construcción de pcbs mediante tecnología cnc y ajuste automático a lasuperficie. *Innovare Revista de ciencia y tecnología*, 3(1):27–41.
- Papandrew, G. (2025). Printed circuit design & fab online magazine - us pcb manufacturing: 8 years later, the same challenges - only bigger. Recuperado el 25 de octubre de 2025, de <https://pcdandf.com/pcdesign/index.php/current-issue/270-board-buying/18591-us-pcb-manufacturing-8-years-later-the-same-challenges-only-bigger>.
- Prianto, E., Pramono, H. S., Husna, A. F., Mustaqim, I., y Kristianto, R. (2025). Development of a mini cnc router machine based on a mini pc for pcb manufacturing. En *AIP Conference Proceedings*, volumen 3281, p. 030001. AIP Publishing LLC.
- Recamlaser (2018). Cnc: ¿qué es y cómo funciona? - recam láser: Recamláser. Recuperado el 27 de mayo de 2025, de <https://recamlaser.com/cnc-que-es-y-como-funciona/>.
- Richard, A. (2019). Create g-code from an eagle file, richard’s website. Recuperado el 24 de junio de 2025, de <https://www.richa1.com/RichardAlbritton/create-g-code-from-an-eagle-file/>.
- Sharma, M., Samanta, A., Huynh, A., y Williamson, S. (2023). Rapid pcb development using co 2 laser and galvo scanner for modular battery management systems. En *IECON 2023-49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1–6. IEEE.