

Diseño, construcción y prueba de una máquina de control numérico por computadora (CNC), para fresado y perforado de placas fenólicas

Carlos Hernández Hernández

Ingeniería en Sistemas Electrónicos (ISE), Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología (FCBIT),
Universidad Autónoma de Tlaxcala (UATx).
Calzada de Apizaquito s/n, Apizaco, Tlaxcala, Tél.: 01241 4172544

Ricardo Mendieta Rodríguez

Ingeniería en Sistemas Electrónicos (ISE), Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología (FCBIT),
Universidad Autónoma de Tlaxcala (UATx).
Calzada de Apizaquito s/n, Apizaco, Tlaxcala, Tél.: 01241 4172544

Miguel Ángel Carrasco Aguilar

Ingeniería en Sistemas Electrónicos (ISE), Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología (FCBIT),
Universidad Autónoma de Tlaxcala (UATx).
Calzada de Apizaquito s/n, Apizaco, Tlaxcala, Tél.: 01241 4172544

Brian Manuel González Contreras

Ingeniería en Sistemas Electrónicos (ISE), Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología (FCBIT),
Universidad Autónoma de Tlaxcala (UATx).
Calzada de Apizaquito s/n, Apizaco, Tlaxcala, Tél.: 01241 4172544,
brian.m.g@ieee.org

Resumen

El maquinado por CNC (control numérico por computadora) tiene como objetivo generar, analizar y ejecutar acciones secuenciales guiadas por una computadora. En el caso de este trabajo, se utiliza para la impresión y fresado de circuitos impresos o PCB, así como también el perforado y corte de placa. Este artículo presenta el desarrollo de un sistema CNC en

prototipo, basado en un sistema de comunicación a través del puerto paralelo, así como el uso de motores paso a paso que son fáciles de ser controlados, siendo accesibles para la construcción de la máquina CNC. El artículo presenta la integración de los dispositivos eléctricos/electrónicos y mecánicos necesarios para diseñar y construir una máquina CNC. Se propone, además, el procedimiento para integrar el software para el diseño de la PCB y generar los archivos para controlar y establecer la comunicación entre la máquina CNC y la computadora personal. El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de una máquina CNC que permita integrar los elementos propios de la Mecatrónica, pues se propone una metodología de fabricación que integra elementos de la mecánica, eléctrica, electrónica y computación para lograr un prototipo funcional.

Palabras Claves: Control Numérico por Computadora (CNC), motor paso a paso, comunicación puerto paralelo, diseño de PCB, tarjeta de circuito impreso.

1. Introducción

Una tarjeta de circuito impreso (PCB - *Printed Circuit Board*) es una tablilla compuesta de un material aislante (baquelita o fibra de vidrio), cubierta en una o ambas de sus caras por una delgada capa de material conductor (cobre) [1, 2]. Mediante el proceso de grabado, algunas zonas del material conductor son eliminadas para formar trayectorias eléctricas que interconecten a los dispositivos electrónicos de un circuito determinado. Posteriormente se utiliza un montaje de dispositivos electrónicos en el circuito impreso, por montaje de inserción, las terminales de los dispositivos entran en las perforaciones que son hechas al impreso para después ser soldadas.

Dentro del proceso de elaboración de PCBs, el control numérico juega un papel importante ya que se define como un sistema controlado por un código binario. El proceso está controlado por un programa que describe los perfiles de posición y tiempo, velocidad, selección de la herramienta y muchas otras características que varían con cada aplicación [1]. El programa está formado por un conjunto de números y letras que siguen un estándar por la EIA (*Electronic Industries Asociation*) o la ISO (*International Standards Organization*).

La aplicación de esta técnica se utiliza a menudo en torneado, taladrado, fresado y en tareas de mecanizado, como en la inserción de componentes electrónicos, soldadura de tubo y los robots de corte [3].

La evolución del control numérico desde el manejo de cintas de papel perforadas para la codificación del programa, hasta el manejo de sistemas de diseño y manufactura, ha dado origen a la necesidad de conocer diferentes áreas y terminologías; algunos ejemplos son los siguientes [1, 2, 17]:

CAD: Diseño asistido por computadora (*Computer Aided Design*). Abarca el uso de un amplio uso de herramientas computacionales, orientadas al área de ingeniería con el objetivo de diseñar elementos con especificación de elementos en 2D y 3D.

CAM: Manufactura asistida por computadora (*Computer Aided Manufacturing*). Procesamiento vía software avanzado para realizar las fases de manufactura de un producto, reduciendo al mismo tiempo al mínimo la intervención del operador.

NC: Control numérico (*Numerical Control*). Aquellos procesos que siguen instrucciones.

CNC: Control numérico computarizado (*Computer Numerical Control*). Igual que el anterior pero incorporando un dispositivo de procesamiento. Se usan indistintamente.

En comparación con los controladores mayores CNC desarrollados, una gran mejora se lleva a cabo en una computadora personal (PC), por la facilidad de añadir nuevas funciones al controlador, como cambiar el algoritmo de control, la adición de nuevos sensores y actuadores no observados previamente en la fase de diseño de la máquina.

Uno de los primeros grandes pasos hacia el uso de la PC como un controlador de la máquina CNC se dio en la década de 1990, cuando se lanzó la primera versión del intérprete NIST RS274/NGC [4]. Muchos otros controladores basados en PC fueron son Turbo CNC y Mach.

En [5] y [17] se presentan los conceptos básicos de la tecnología CNC. Por otra parte referencias como [6, 7, 17] son más aplicables al diseño mecanizado de partes, ya que estos trabajos están enfocados a movimientos segmentados, mientras que trabajos como [8] se dirigen principalmente a las piezas realizadas con CAD, ya que la tecnología CAD se basa en

gran medida en NURBS (*no uniforme racional spline base*) y las curvas de forma compleja que no se previeron en los conceptos tradicionales del NC. En [15, 16] se presentan, además del mecanizado, el diseño de los diagramas del circuito, sin embargo no mencionan como es que interactúan en conjunto todos los elementos.

En este artículo se presenta la realización de un sistema CNC basado en un robot cartesiano de 3 grados de libertad, denominado en lo sucesivo como máquina CNC, con la finalidad de desarrollar tarjetas de circuito impreso (PCB). En la parte hardware, se presentan los bloques principales de la máquina CNC y su integración para el desarrollo físico de la misma. En la parte software, se presentan los pasos y programas para realizar de un diseño del simulador de circuitos a un layout del PCB, creando posteriormente el código G que permite transferencia directa a través del puerto paralelo de la PC hacia la máquina CNC, ya diseñada y construida.

2. Descripción del sistema (Diseño de la estructura)

El diseño será descrito en base a sus componentes

Estructura mecánica: corresponde a las partes mecánicas del diseño de la máquina CNC, la cual consta de tres ejes de posicionamiento, con sus correspondientes actuadores y sensores; además de un motor de corriente alterna (AC) para el fresado.

Hardware: constituido por los dispositivos electrónicos que se encargan de recibir los datos de la PC, generar posteriormente las señales de control para cada uno de los ejes de posicionamiento, así como para los motores paso a paso y sus sensores.

Software: incluye el diseño de la PCB, la generación y lectura de archivos descriptivos, la interfaz del usuario, visualización y comunicación de las coordenadas y demás datos necesarios al controlador, a través del puerto paralelo de la PC.

3. Estructura mecánica

Los elementos comunes que intervienen en el diseño de una máquina CNC son: los motores paso a paso, los engranajes de acoplamiento o correas de transmisión, el tornillo de guía o husillo (varilla roscada o tornillo sin fin), los cojinetes, el eje de guía, los baleros de rodamiento. El sistema de coordenadas cartesianas tiene 3 ejes (X, Y, Z), cada uno perpendicular a los otros dos, como se muestra en la Fig 1. Este tipo de máquina puede ser visto como un robot cartesiano de 3 grados de libertad, permitiendo el movimiento de un punto a otro en una base, acoplándose perfectamente para el trazado de pistas y agujeros en PCBs.

En cada uno de estos ejes se considera un motor paso a paso conectado a través de los engranajes de acoplamiento a la varilla roscada (eje), como un convertidor de movimiento rotacional a un convertidor mecánico de traslación.

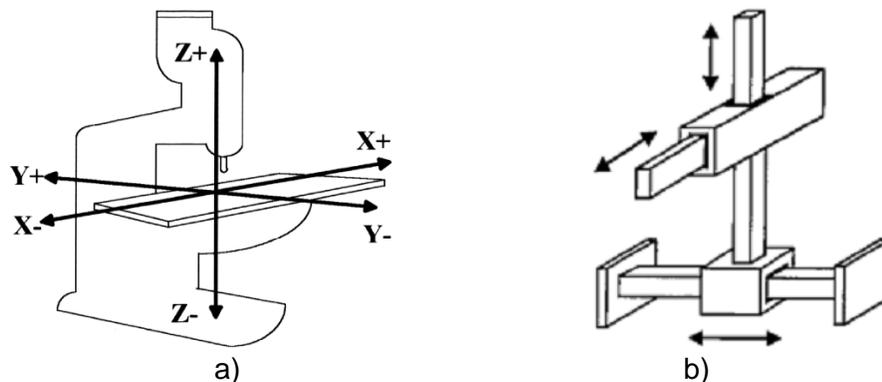


Fig. 1. Máquina CNC, con tres ejes cartesianos: a) forma genérica, b) vista como robot cartesiano.

Los movimientos en X-Y se realizan a través de una varilla roscada que suele ir acompañada de los ejes de guía (Fig. 2 a)) [15]. Los ejes guía absorberán todos los esfuerzos y no permitirán que las placas de sujeción giren. Las varillas roscadas tienen un paso de 1.5 mm, y los motores un avance rotacional de 1.8° para paso completo y 0.75° para medio paso. El modelo se diseñó y se realizó en el software de modelado Solid Works (SW) [8, 18]. La ventaja de usar este software radica en poder no sólo diseñar y modelar, sino simular la

utilización de todas la piezas mecánicas que han de soportar una serie de ensayos según su las condiciones a las que estarán sometidas durante su vida útil.

El sistema consta de una mesa con movimiento X-Y, la mesa está hecha con un material rígido (madera, aluminio y acero) para evitar errores debidos a vibraciones. En la actualidad el tamaño de la mesa es (64.3 x 40.5 cm), demostrando que no hay un tamaño delimitado para la tablilla del circuito impreso. Teniendo en X-Y una velocidad de posicionado de 100 mm/min, que es la máxima velocidad utilizada según las especificaciones de los motores (ver sección 4.4).

El efector final consiste de un sujetador de herramienta, que consiste de un mini router de mano que está montado en el conjunto del eje Z (Fig. 2 b)). Esta herramienta tiene una velocidad de hasta 20,000 revoluciones por minuto (RPM), pueden trabajar sin sobrecalentamiento durante largos períodos de tiempo. El desplazamiento del eje Z es de baja velocidad ya que está en función de la dureza del material con el que se trabaje.

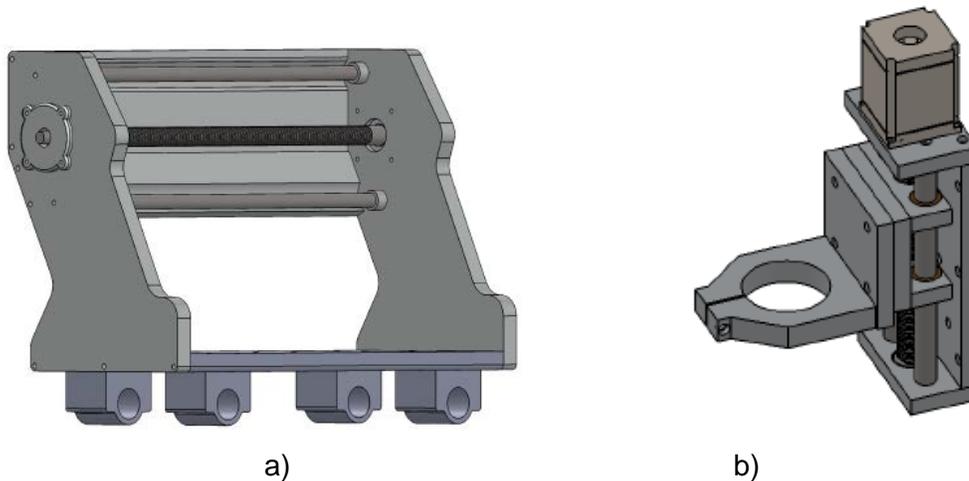


Fig. 2. Máquina CNC en SW: a) Diseño del desplazamiento X-Y con varilla roscada y ejes guía, b) Eje Z modelado en SW.

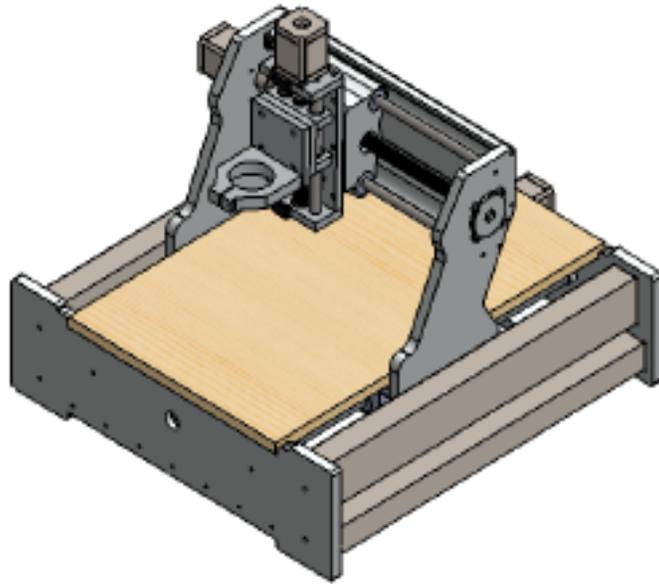


Fig. 3. Diseño mecánico completo de la máquina CNC, modelado en SW.

Los esquemas de las piezas en su forma sólida, también fueron creados en dibujo con todas las medidas y cotas en cada pieza, para modelado de piezas y simulación (que se muestra en la Fig. 3), y sobre todo para su elaboración por maquinado.

La ubicación de los componentes corresponde a la arquitectura de un robot cartesiano como se puede ver en el diseño de SW y en la construcción de la máquina CNC, como se muestra en la Fig. 4.

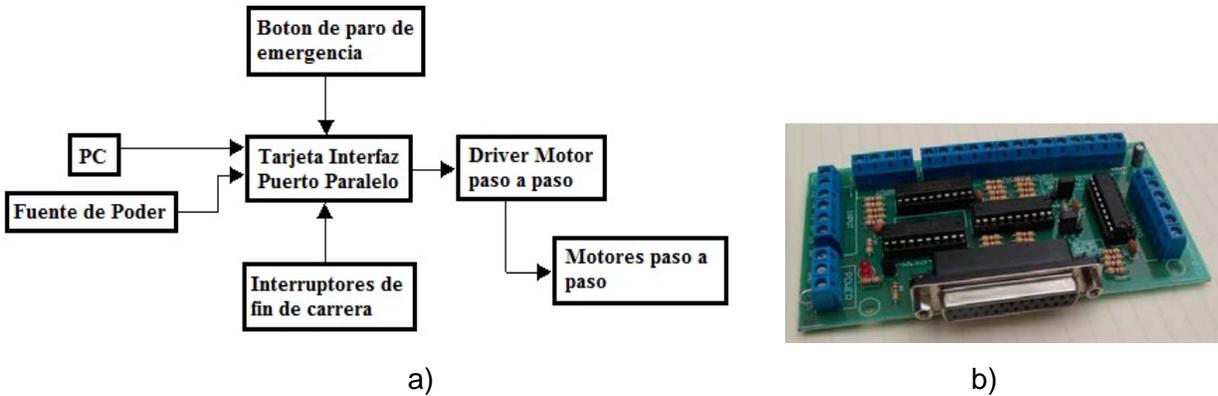


Fig. 5. a) Esquema completo de la máquina CNC; b) Tarjeta interfaz puerto paralelo.

4.2. Tarjeta Interfaz Puerto Paralelo

El puerto paralelo de una PC es ideal para ser usado como herramienta de control de motores, relés, LED's, etc. Se considera para ello una tarjeta de control (Fig. 5 b)) que proporciona una manera fácil de interconectar sus entradas y salidas [9].

Tiene terminales para las conexiones y el acondicionamiento de las señales para su uso en aplicaciones en CNC. Las salidas y entradas de esta tarjeta están conectadas a través del uso de buffers de alta velocidad y de alta corriente que permite, a la salida de la tarjeta, enviar las señales sin necesidad de utilizar la energía del puerto paralelo. Se puede tomar la señal de +3.3, +5 Vcc del puerto paralelo y ofrecer una salida de +5 Vcvc a 24 mA.

4.3. Driver motor paso a paso

El controlador para los motores paso a paso convierte los impulsos recibidos de la tarjeta de interfaz del puerto paralelo en el mando de las señales de los embobinados del motor paso a paso. La fuente de alimentación está conectada al conductor que alimenta los devanados de los mismos motores. Esto se debe conectar correctamente con el controlador para poder funcionar ya que si está mal cableado sólo va a zumbar, vibrar y no girar.

La mayoría de los conductores se conectan a la tarjeta de interfaz puerto paralelo que a su vez manda las señales a los motores (ver Fig. 6 a)). Cada motor paso a paso necesita dos señales: una para la frecuencia y una para la dirección.

Este driver [10] controla los motores paso a paso híbridos de dos fases, el voltaje de la impulsión está en el intervalo de 18Vdc a 50Vdc. El esquema de conexiones se muestra en la Fig. 6. Está diseñado para su uso con 2-fases de motor paso a paso híbrido de todo tipo con 42 a 86 mm de diámetro exterior y corriente de fase menor a 4.0A.

La limitación de la corriente es importante, porque al hacerlo, la tensión puede aumentarse de manera que el motor gane poder. Si se excede el límite de corriente del motor se puede quemar o sobrecalentarse.

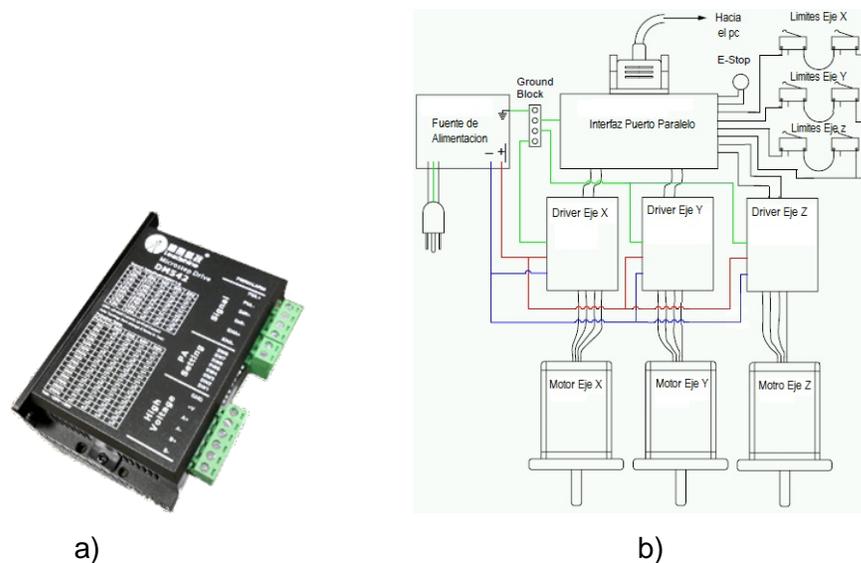


Fig. 6. a) Driver para motor paso a paso; b) Esquema de conexiones para cada motor en la máquina de CNC.

La tarjeta interfaz del puerto paralelo da la posibilidad de conectar un botón de paro de emergencia así como interruptores de final de carrera. Estos interruptores advierten al equipo

acerca de los límites físicos del espacio de trabajo, por lo que el software de control detendrá la máquina antes de tenga una colisión.

4.4. Motor paso a paso

Los motores paso a paso (Fig. 7) considerados en el diseño de esta máquina CNC, tienen los datos de la tabla 1 [11]. Para el trabajo de grabado se pueden usar velocidades medias y menores para materiales más duros. Por ejemplo, 100 mm/min para plásticos blandos, 90 mm/min para maderas blandas, 80 mm/min para el material de diseño de placas PCB, 50 mm/min para maderas duras, 40 mm/min para aluminio.



Fig. 7. Motor paso a paso.

Para el diseño de placas PCB se utiliza una velocidad de 80 a 60 mm/min, debido a que si se utiliza mayor velocidad las brocas para fresado pueden romperse. Igualmente puede experimentarse con la máquina la velocidad más conveniente para cada tipo de material; también debe tenerse en cuenta las características de las fresas, la potencia de la herramienta que la mueve y la profundidad de fresado que se emplea.

ESPECIFICACIONES GENERALES	
Fase	2 FASES
Angulo de paso	1.8 ± 5% */step
Voltaje	4.8 V
Corriente	3.0 A/Fase
Resistencia	1.6 ± 10% Ω/Fase
Inductancia	6.8 ± 20% mH/Fase
Sostenido torque	250 N.cm Min
Par de tensión	6.5 N.cm Max

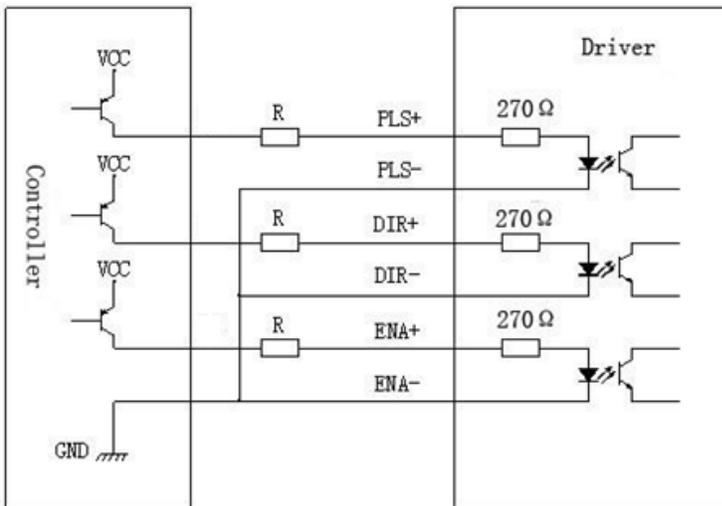
Tabla 1. Especificaciones del motor paso a paso.

4.4. Diagrama de cableado de pines

Las señales de control de la PC pueden ser activos en niveles eléctricos de alto y bajo. Cuando el nivel eléctrico alto está activo, todas las señales a negativo se conectan entre sí a GND. Cuando el nivel bajo está activo, todas las señales positivas de control se conectan entre sí a un puerto. La figura 8 a) muestra el diagrama de conexiones.

4.5. Finales de carrera

Se pueden conectar 6 finales de carrera (del tipo mostrado en la Figura 8b)) al terminal de la tarjeta de interfaz puerto paralelo. El software se puede configurar para trabajar con interruptores normalmente cerrados (NC) o abiertos (NA).



a)



b)

Fig. 8. a) Diagrama de tarjeta de puertos de entrada y salida; b) Interruptor de final de carrera.

Los interruptores sirven para tener una referencia absoluta en la máquina, y no son necesarios si se prefiere tener el origen en la pieza de trabajo. Los interruptores están montados en cada uno de los extremos de los ejes (X-Y-Z), y sirven para detectar la posición de un elemento móvil mediante accionamiento mecánico.

5. Software de Control

Hay muchas aplicaciones de software que controlan las máquinas de CNC de fresado (Mach3, K- Cam, CamSoft, Kay), así como otras máquinas CNC (tornos, cortadoras y otros). Específicamente, Mach 3 [12] es un software para control computarizado que permite la comunicación con los motores paso a paso a través de la tarjeta interfaz de puerto paralelo, usando una computadora. Funciona con el sistema operativo Windows XP. Se recomienda usar un ordenador de sobremesa, porque las portátiles emplean corrientes muy bajas en el puerto paralelo por motivos de consumo.

Los conocimientos de programación en código G no son absolutamente necesarios para poder operarla, ya que existe software que puede ser utilizado para generar el programa de

código G que se puede cargar en el software de control. El software de control debe ser configurado antes de la primera utilización de la máquina.

5.1. Diseño de PCB y generación de archivos Gerber

El diseño de un circuito impreso a menudo requiere de programas de diseño electrónico automatizado, para distribuir e interconectar los componentes. Estos programas convierten el esquemático en una lista de los pines y nodos del circuito, a los que se conectan los pines de los componentes. Para esta aplicación se emplea el programa de diseño Proteus Professional, el cual es común en el área electrónica tanto profesional como académicamente. Este permite generar un esquema de contornos de las líneas del circuito impreso como se muestra en la Fig. 9. Una vez con estos datos, se procede a obtener los archivos Gerber.

Gerber es un formato libre 2D usado comúnmente para diseño de PCBs, que permite describir las imágenes de los mismos (observe la Fig. 10): capas de cobre, máscaras de soldadura, leyendas, capas auxiliares, pads, etc.

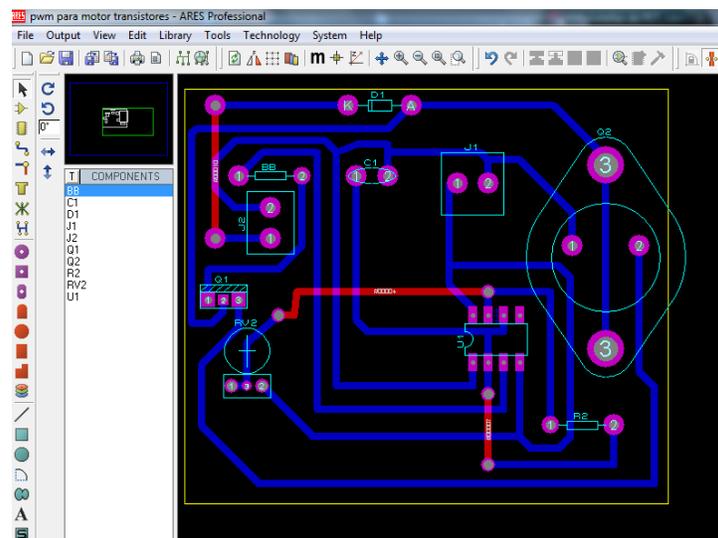


Fig. 9. Esquema del circuito impreso en Proteus Profesional.

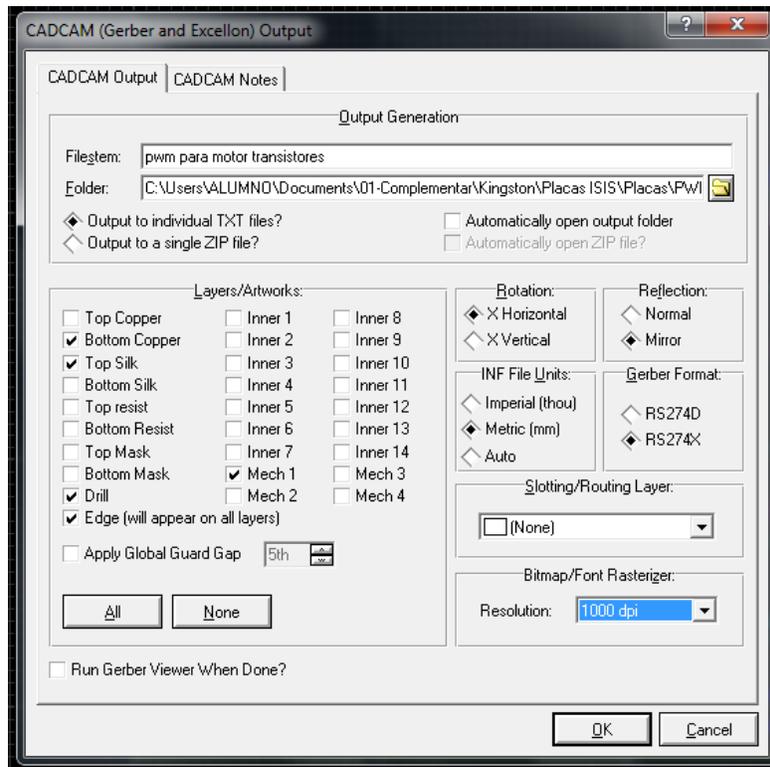


Fig. 10. Generación de archivos Gerber y selección de capas.

Empleando este esquema en Proteus, es posible minimizar el desgaste de la herramienta de corte al realizar el fresado, ya que no será necesario retirar todo el metal hasta obtener las líneas conductoras sino únicamente el contorno de dichas líneas. En Proteus se genera un archivo en formato Gerber RS-274X, que contiene las coordenadas tanto de los contornos como de las perforaciones (pads).

Después son generados los archivos Gerber para proceder a exportar las capas necesarias para el fresado, perforado y cortado de la placa (Fig. 10). Posteriormente estos archivos son abiertos en el software CopperCam, en donde se realiza la lectura de las instrucciones, e interpretar cada una de las características de la PCB descritas entre ellas, el tipo de interpolación, el formato de las coordenadas, la unidad de medida (mm o in) y el tipo de movimiento, es decir desplazar sin trazar, desplazar trazando y marcar un punto (perforar). Con esta información el programa realiza un esquema preliminar de la PCB en pantalla tal como se muestra en la Fig. 11.

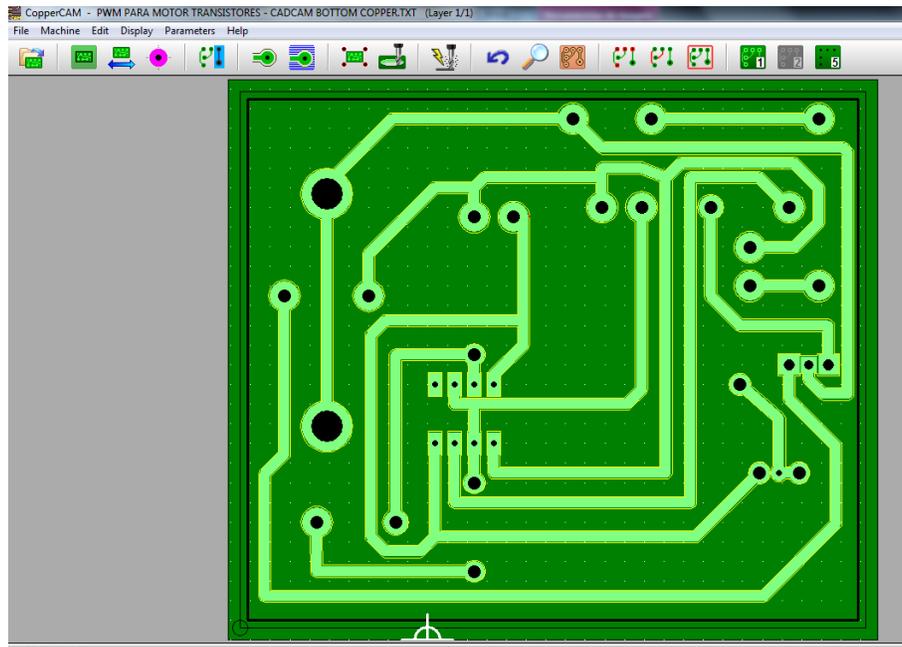


Fig. 11. Vista preliminar del PCB en CopperCam.

Es necesario cargar dos archivos: uno para el trazado de las líneas del circuito y otro para la perforación de los agujeros en los cuales se ubican los dispositivos. Hecho esto, se generan los archivos que contienen el código G, que es un lenguaje de programación vectorial mediante el cual se describen e indican el orden de fresado a través de acciones simples y entidades geométricas sencillas (básicamente segmentos de recta y arcos de circunferencia) junto con sus parámetros de maquinado (velocidades de husillo y de avance de herramienta). Una vez generados los archivos en código G, se exportan hacia Mach3 (ver Fig. 12). El proceso de fresado se inicia con un comando dentro de la aplicación, ésta genera la condición de coordenadas, es decir ubica la fresa en (X, Y, Z). Una vez que se ha ubicado en estos puntos se enciende el mini router, encargado del fresado. A continuación el programa envía las coordenadas de cada uno de los ejes al circuito de control y verifica la ejecución de los movimientos, empleando el puerto paralelo.

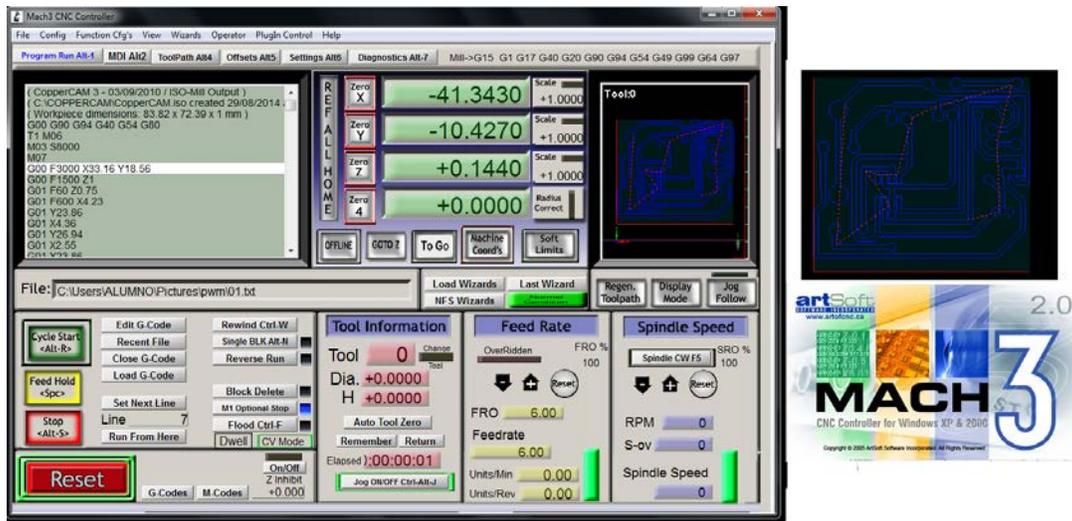


Fig. 12. Interfaz de control Mach 3.

6. Resultados

Inicialmente se realizaron pruebas para observar: la capacidad del corte de la fresa, la fuerza de desplazamiento necesaria para obtener un corte y la velocidad que permite proporcionar dicha fuerza. En la Fig. 13 se observan los cortes realizados para las pruebas mencionadas. Con base en las pruebas realizadas se determinaron los parámetros de la Tabla 2.

Parámetro	Cantidad
Error de posicionamiento	0.1 mm
Velocidad de posición	100 mm/min
Max. Vel. de trabajo	100 mm/min
Min. Vel. de trabajo	5 mm/min
Ancho de corte	0.8 mm – 0.5 mm
Max. Vel. de corte	80 mm/min
Profundidad de fresa	0.2 mm
Min. separación de pistas	0.27 mm

Tabla 2. Parámetros obtenidos para el funcionamiento.

Una vez realizadas las pruebas, se ajustaron los parámetros en CopperCam y en la tarjeta de control. El proceso de fresado, el cual aparece en la Fig. 13, toma aproximadamente un tiempo de 25 min en elaborar un circuito descrito en 1066 líneas de instrucciones en código G. La forma en que trabaja la máquina CNC construida se muestra a través de un video en [13].

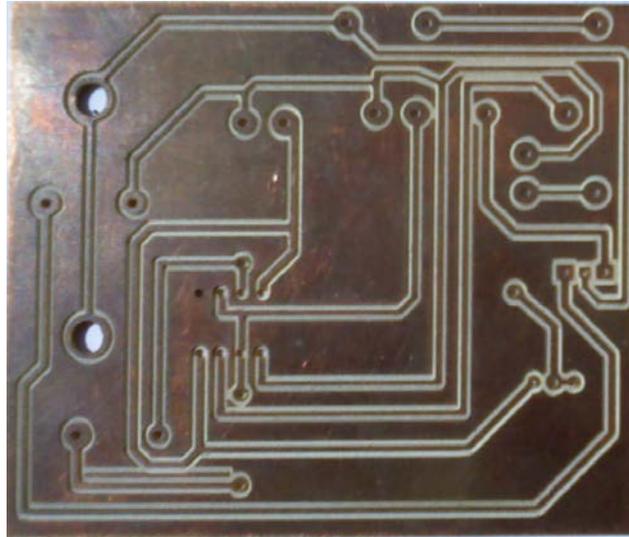


Fig. 13. PCB de prueba.

6.1. Pruebas para validación

Se realizó una PCB empleando el método de fabricación manual, la cual presentó algunos defectos durante el planchado de la placa, por otro lado se utilizó la técnica del cloruro férrico para poder crear las pistas.

Realizando una comparación con los resultados obtenidos con la máquina CNC es posible afirmar que fabricar una PCB sin defectos en la falta de continuidad, desgaste y la porosidad de las líneas de interconexión de las pistas, que se presenta comúnmente con el método tradicional. Además, del tiempo de fabricación, partiendo del diseño de circuito con los

programas antes mencionados, fue aproximadamente la tercera parte del tiempo empleado en el método manual. Consúltese [13] para una prueba.

7. Conclusiones

La complejidad y la fiabilidad de la máquina CNC dependen principalmente del presupuesto de construcción. Si el presupuesto es lo suficientemente grande, el resultado puede estar cerca de una máquina industrial que puede ser utilizado durante años sin reparaciones mayores y con una precisión de hasta 0.001 mm. La elaboración de circuitos impresos en PCB usando la máquina CNC es sencilla pues basta con crear el layout del circuito, previa simulación en Proteus, crear el archivo Gerber y posteriormente cargarlo en el software CopperCam para generar el código G para proceder con el maquinado a través de Mach 3.

Se mejora la calidad de los circuitos impresos ya que el cobre de la baquelita de PCB no se ve afectado por el cloruro férrico, dando óptimas líneas de interconexión entre los dispositivos y la duración del mismo. La repetibilidad en la realización de múltiples impresos, es mejorada ya que el prototipo realiza en cada uno, un proceso exactamente igual al anterior.

La utilización del puerto paralelo es conveniente, en proyectos que requieran una interfaz con la computadora para poder trabajar, de hecho la computadora es quien envía las señales digitales a la interface para que este pueda hacer funcionar los motores a pasos a través de los drivers. Este puerto nos permite la entrada de hasta 9 bits o a la salida de 12 bits en cualquier tiempo dado, requiriendo con esto un mínimo de circuitos externos para implementar varias tareas simples; ya que el mismo posee un bus de datos de 8 bits (Pin 2 a 9), que permiten el flujo de información, 4 líneas de control y 5 líneas de estado, que pueden ser usadas fácilmente. Debido a su sencillez aun sigue siendo una interfaz utilizada en esta área debido a su sencillez, ya que pues incluso programas para máquinas CNC, como Mach3, la requieren.

Trabajos posteriores consideran realizar el cambio del puerto paralelo por el del USB, además de hacer pruebas con diseños de PCBs más complejos y finos.

8. Agradecimientos

Este proyecto fue financiado por la UATx en el marco del Programa Estratégico CACyPI-UATx-2014, junio 2014 - diciembre 2014.

9. Referencias

- [1] M. Groover. *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. 2008. Prentice Hall, Inc., New Jersey.
- [2] P. N. Rao, *CAD/CAM Principles and Applications*. Second Edition. 2002. Mc Graw-Hill.
- [3] P. Smid, *CNC Programming Handbook*. Second Edition. 2003. Industrial Press Inc., New York.
- [4] T. R. Kramer, F. M. Proctor E. Messina, "The NIST RS274/NGC Interpreter – Version 3", National Institute of Standards and Technology, August 17, 2000.
- [5] Madison, *CNC Machining Handbook*. 1996. Industrial Press Inc., New York.
- [6] A. Overvy, *CNC Machining Handbook Building Programming and Implementation*. Mc Graw Hill. San Francisco, Chicago.
- [7] D. K. Steele, *CNC Router Plans*. 2008.
- [8] P. Radhakrishnan, S. Subramanyan, V. Raju, *CAD/CAM/CIM*. Edition 3. 2011. New Age International Publishers.
- [9] Tarjeta Interfaz Puerto Paralelo.
http://cnc4pc.com/Tech_Docs/C10R8_User_Manual.pdf. Mayo 2014.

- [10] Driver DM542. <http://www.americanmotiontech.com/upload/Manuals/DM542m.pdf>. Mayo 2014.
- [11] Motor Paso a Paso. <http://catalog.ssstatic.com/catalog-4190640-67.pdf>. Mayo 2014.
- [12] Mach3,
<http://tallerdedalo.es/web/sites/tallerdedalo.es/files/file/ManualMach3castellano.pdf>. Mayo 2014.
- [13] Placa de PCB en CNC,
https://www.youtube.com/watch?v=qfki083_kOk&feature=youtu.be Junio 2014.
- [14] A. Joy, "Design of a Computer Numeric Control System with Open Software Tools". International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. Vol. 3, February 2014.
- [15] G. Jodh, P. Sirsat, N. Kakde. S. Lutade. "Design of low Cost CNC Drilling Machine". International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. Vol. 2, Feb-Mar 2014.
- [16] M. A. Rendón, J. A. Ibarra, M. Zavala. "Diseño de una fresadora CNC para Pymes enfocada a la fabricación de circuitos impresos PCB". CONAEE 2014. 3er congreso. 9-11 de abril 2014.
- [17] A. López, E.Ortiz, G. M. Padilla, "Diseño y manufactura de prototipo de fresado vertical CNC". Instituto Politécnico Nacional. Septiembre 2013.
- [18] M. Castro-Cedeño, Introduction to SolidWorks, 2011, e-book site:
<https://forum.solidworks.com/servlet/JiveServlet/download/389205-112203/Intro%20Solidworks.pdf>

9. Autores

Carlos Hernández Hernández, es egresado de la licenciatura en Ingeniería en Sistemas Electrónicos (ISE) en 2014, en la Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología (FCBIyT) de la Universidad Autónoma de Tlaxcala (UATx).

Ricardo Mendieta Rodríguez, es estudiante de la licenciatura en ISE, en la FCBIyT de la UATx.

Miguel Ángel Carrasco Aguilar es doctor en ciencias en ingeniería electrónica egresado del INAOEP. Es líder del Cuerpo Académico de Sistemas Electrónicos y Automatización dentro del Programa Educativo de ISE.

Brian Manuel González Contreras es ingeniero Eléctrico, con Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica con especialidad en control automático (CENIDET, Morelos, México). Es Doctor en Control Automático, Procesamiento de Señales e Informática (Universidad Henri Poincaré, Nancy, Francia). Es profesor-investigador del Programa Educativo de ISE.