

Tipo de artículo: Artículo original

Reutilización de enrutador de control numérico computacional empleando software libre

Reuse of Computer Numerical Control (CNC) router using open-source software

Yubismel Perdomo Velázquez^{1*} , <https://orcid.org/0009-0005-7821-6906>

David Batard Lorenzo² , <https://orcid.org/0009-0007-3555-2875>

¹ Departamento de Formación de Pregrado, VRF, Universidad de las Ciencias Informáticas. yubismel@uci.cu.

² CEMC, Facultad CITEC, Universidad de las Ciencias Informáticas. dbatard@uci.cu.

* Autor para correspondencia: yubismel@uci.cu

Resumen

El Control Numérico Computacional(CNC) es el control de una máquina o herramienta usando números y letras. Es un sistema en el cual los valores numéricos programados son directamente insertados o almacenados para ser leídos y decodificados provocando el movimiento deseado en la máquina que se está controlando. Algunos ejemplos de máquinas son: fresadoras, tornos y máquinas de corte por descargas eléctricas. Generalmente cuentan con un software de control propietario, muy caro, carente de soporte y difícil de mantener. El presente trabajo tiene como objetivo realizar la adaptación de software y hardware sobre una máquina de control numérico obsoleta para lograr su reutilización. Se realiza una fundamentación teórica sobre el tema en cuestión y se describe la propuesta de solución. Se hace uso de software libre como: grbl 1.1, Universal G-Code Sender 2.0 e Inkscape 0.92.4 y se emplea hardware abierto, específicamente arduino uno r3. Como resultado se obtiene una máquina totalmente funcional capaz de realizar todas las operaciones para lo que originalmente fue diseñada. Esta, ganó versatilidad al añadirle la capacidad de realizar otros tipos de tareas como el dibujo de figuras en espacios 2D y 3D y el cambio de herramientas de trabajo entre las que se destacan: cortador y grabador laser, extrusora de material fundido y herramientas rotativas multifuncionales.

Palabras clave: arduino; cnc; fresadora; grbl; plotter

Abstract

Computer Numerical Control(CNC) is the control of a machine or tool using numbers and letters. It is a system in which the programmed numerical values are directly inserted or stored to be read and decoded, causing the desired movement in the machine being controlled. Some examples of machines are: milling machines, lathes, electric discharge cutting machines. Generally these machines have very expensive proprietary control software, lacking support and difficult to maintain. The objective of this work is to carry out the adaptation of software and hardware on an obsolete numerical control machine to achieve its reuse. A theoretical foundation is made on the subject in question and the solution proposal is described. Free software is used such as: grbl 1.1, Universal G-Code Sender 2.0 and Inkscape 0.92.4 and also open hardware is used, specifically arduino uno r3. The result is a fully functional machine capable of performing all the functions for which it was originally designed, gaining in versatility by adding the ability to perform other types of tasks such as graphing figures in 2D and 3D spaces and changing work tools between one laser variety, cast extruder and multifunctional rotary tools.

Keywords: Arduino; cnc; grbl; milling machine; plotter



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional**
(CC BY 4.0)

Recibido: 21/03/2023
Aceptado: 23/06/2023
En línea: 01/07/2023

Introducción

CNC es la abreviatura de Control Numérico Computacional por sus siglas en inglés. Se basa en la automatización de máquinas herramientas que operan con comandos de programas cargados en un medio de almacenamiento. La introducción de tales máquinas supuso una revolución en los procesos de producción (Štefan et al., 2020). Siguiendo estrictamente la terminología, hay una diferencia en el significado de las abreviaturas NC y CNC. El NC se usa para referirse a la tecnología de control numérico más antigua y original, por su parte la abreviatura CNC representa la nueva tecnología, un sucesor moderno de su pariente más antiguo. En la práctica diaria, CNC es la abreviatura preferida (Peter, 2007).

La tecnología de control numérico como se conoce hoy en día, surgió a mediados del siglo XX. Se remonta al año 1952 y se relaciona con la Fuerza Aérea de los Estados Unidos de América y con el Instituto de Tecnología de Massachusetts en Cambridge. El principal precursor fue John Parsons (1913-2007), quien estuvo estrechamente asociado con la invención del control numérico. No se aplicó en la producción hasta principios de la década de 1960. El verdadero auge llegó en forma de CNC, alrededor del año 1972, y una década más tarde con la introducción de microcomputadoras más asequibles (Peter, 2007).

Según (Štefan et al., 2020) el Control Numérico Computacional (CNC) es el control de una máquina usando números y letras. Es un sistema en el cual los valores numéricos programados son directamente insertados y almacenados en alguna forma de medio de entrada, automáticamente leídos y decodificados para provocar el movimiento correspondiente en la máquina que se está controlando. Las máquinas CNC han cambiado en los últimos 20 años, no solo desde el punto de vista de la calidad de los trabajos realizados sino también de la variedad de tareas que pueden hacer. Esto ha sido posible por la incorporación y uso de microcontroladores con capacidades de cómputo relativamente altas. Lo que ha permitido que en el campo de la tecnología automatizada se hayan desarrollado nuevos tipos de máquinas que solucionan los problemas que las generaciones anteriores no podían resolver.

En las industrias manufactureras el proceso de fabricación juega un factor importante en cuanto a los costos de los productos, se realizan esfuerzos para mejorar la capacidad de fabricación y reducir el coste de producción. Estos esfuerzos son encaminados a crear componentes complejos y con cero defectos, lo que se considera como una etapa



superior en el proceso al que se han enfrentado las máquinas CNC (Wikan et al., 2011). Estas, predominan actualmente en la industria de la construcción de maquinaria. En general, son equipadas con sistemas de control suministrados por los principales fabricantes del mundo, como Siemens y Fanuc, que a su vez son muy caros. Paralelamente, se están desarrollando muchas soluciones baratas para aficionados y personal no profesional. Uno de los más grandes desafíos actuales es cómo hacer que la tecnología CNC sea asequible, más simple y esté disponible hasta el punto de que incluso el usuario ocasional puede pensar en usar tal tecnología (Khan et al., 2020).

En las industrias de fabricación actuales, las máquinas herramienta CNC desempeñan un papel fundamental y tienen una amplia gama de aplicaciones en el mecanizado, como centros de mecanizado, centros de torneado, mecanizado por chorro de agua abrasivo, mecanizado por electroerosión. En general tienen aplicaciones notables en la industria aeroespacial, astilleros, automóviles y en la confección de matrices y moldes (Divyangkumar et al., 2018). Entre los principales tipos de máquinas CNC se encuentran:

Fresadoras, usan un cortador rotatorio para el movimiento de corte y un movimiento lineal para la alimentación. El material es empujado en el cortador, o el cortador es empujado al material en caminos rectos o curvos tridimensionales, para producir los elementos deseados de una pieza. La pieza resultante es creada mediante la remoción de todo el material innecesario desde la pieza de trabajo.

Tornos, rotan la pieza de trabajo en contra de un único punto de una herramienta para producir movimiento de corte. La herramienta se alinea a lo largo o en la pieza para producir el movimiento de alimentación.

Centros de Maquinado, son máquinas CNC más sofisticadas que frecuentemente combinan las tecnologías de fresado y torneado.

Máquinas EDM (*Electrical Discharge Machine*), usa chispas eléctricas para hacer una cavidad en una pieza de metal. Este proceso requiere de un electrodo, una fuente de poder, un tanque y un enfriador. La pieza de trabajo se conecta a un lado de la fuente de poder y se coloca en el tanque. El electrodo, construido en la forma de la cavidad deseada, se conecta al otro lado de la fuente de poder. El tanque se llena con enfriador, este es un material dieléctrico que opone una resistencia al flujo de la electricidad. Se baja el electrodo hasta que una chispa salta entre el electrodo y la pieza de trabajo. Cuando la chispa salta, libera pequeñas partículas de material que son eliminadas por el enfriador. Se crea así una cavidad de la misma forma que el electrodo. Se baja el electrodo al ritmo que se fabrica la cavidad y hasta que se logra la profundidad apropiada.

Robots industriales, máquinas especializadas que son un reemplazo directo del trabajo humano. Se utilizan para realizar consistentemente tareas monótonas, repetitivas o difíciles. Comúnmente se emplean en: fundición, pintura, soldadura, transferencia de materiales entre otros.



Plotter CNC, tipo especial de impresora que utiliza una herramienta para dibujar imágenes en superficies sólidas. Utiliza un microprocesador que es capaz de procesar instrucciones lógicas provenientes de una computadora. Las instrucciones lógicas son proporcionadas en forma de código, texto o imagen que luego se transforma en un lenguaje de máquina para ser ejecutados. Se puede utilizar para fines tales como diseño de circuitos impresos, diseño de logotipos, etc (Neha et al., 2018).

Estas máquinas tienen varias cosas en común, una de ellas es que interpretan el lenguaje G-Code. Este es un lenguaje descriptor de operaciones, sus comandos describen los movimientos y las operaciones necesarias que se deben llevar a cabo.

Algunos fabricantes de máquinas CNC al cabo del tiempo dejan de proveer actualizaciones o soporte para el uso de sus equipamientos, incluso conociendo que la parte estructural de los mismos se encuentran en óptimas condiciones para continuar en operación. Es por eso que se hace necesario buscar alternativas para alargar la vida útil de estos equipos, siendo ese el objetivo de este trabajo. Para lograr el funcionamiento y correcto uso de una máquina CNC se requieren varios elementos como se muestra en la figura 1.

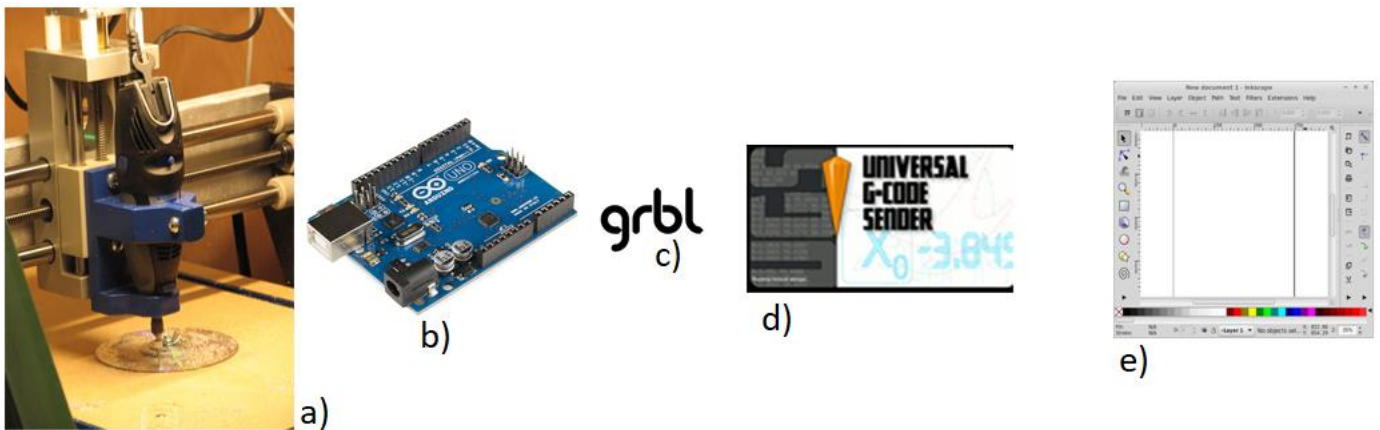


Figura 1. Componentes necesarios para el correcto funcionamiento de una máquina CNC.

Figura 1.a, Muestra la estructura física con capacidad para realizar el movimiento de alguna herramienta en un espacio tridimensional. Es la parte vital de la herramienta de mecanizado. Combina todos los componentes en un solo sistema. Es la pieza fundamental para lograr la eficiencia, ya que afecta directamente la rigidez dinámica total y también afecta la respuesta de amortiguamiento. La estructura perfectamente diseñada puede permitirse una alta rigidez, lo que conduce a un funcionamiento preciso (Khan et al., 2020).



Figura 1.b, hace referencia a la electrónica controladora, se encarga de operar los motores eléctricos que controlan las posiciones de las herramientas dentro de la estructura física. Generalmente se basa en el uso de microcontroladores y puede interpretar órdenes en código *G-Code* .

Figura 1.c, Firmware o software de control de la máquina.

Figura 1.d, Software para el envío de órdenes a la máquina generalmente usando el lenguaje *G-Code*.

Figura 1.e, Software para la creación de *G-Code* a partir de la pieza que se necesita realizar.

Específicamente, una máquina de fresado CNC consta de tres ejes x, y, z para el movimiento tridimensional de la herramienta de trabajo. Los datos numéricos necesarios para su funcionamiento son proporcionados por un programa que a su vez convierte los datos numéricos en señales eléctricas. Estas señales eléctricas luego se dan como entrada a los motores paso a paso. Cada señal especifica un punto en las coordenadas y según estos se mueve la herramienta. La máquina consta de una unidad de procesamiento de datos. Al recibir el programa a ejecutar, la unidad de procesamiento de datos lo interpreta y lo convierte en códigos de máquina internos (Khan et al., 2020).

El firmware constituye un elemento clave para el funcionamiento de estos dispositivos. De este dependen todos los otros elementos. Existen varios con diferentes funcionalidades. Mach3, es un software comercial muy utilizado que funciona sobre una familia de hardware diversa, tiene un costo relativamente alto al igual que los controladores donde se instala. Marlin, es un software libre, gratuito y de código abierto. Usualmente utilizado en impresoras 3D aunque también se puede instalar en máquinas CNC. Es compatible con una gran familia de dispositivos de hardware abierto. Otro muy popular es grbl, alternativa sin compromisos, de alto rendimiento y bajo costo para control de movimiento basado en puerto paralelo para fresado CNC. Se ejecutará en un Arduino siempre que tenga un chip Atmega 328. Acepta *G-Code* y familias compatibles con los estándares y ha sido probado en varias herramientas CAM sin problemas. Los arcos, círculos y el movimiento helicoidal están totalmente soportados, así como todos los demás comandos principales de código (Harish et al., 2017). De forma general es semejante a Marlin pero está optimizado para dispositivos CNC. Es de fácil instalación, se puede configurar de una forma bastante sencilla y no requiere tener conocimientos muy avanzados para su utilización. Sprinter, es semejante a los dos anteriores pero con un menor soporte en la comunidad de usuarios y es compatible con una menor cantidad de dispositivos.

Materiales y métodos

En este trabajo se realizó un estudio sobre los sistemas CNC, analizando su estructura, la parte electrónica y el software utilizado. Se investigaron además otras soluciones existentes. Para esto fue necesario hacer uso del método analítico-sintético en el proceso de búsqueda de información, se utilizó para clasificar y analizar la documentación



relacionada con el tema de investigación, permitió concentrarse en los elementos verdaderamente importantes ligados al trabajo a realizar. Permitted el dividir y analizar el objeto de estudio en cada una de sus partes y luego acoplarlas para estudiarlas de manera integral.

Se buscaron alternativas de software y hardware libres que pudieran integrarse con la estructura existente. Para crear el sistema se usaron los métodos de modelación y el sistémico estructural permitiendo modelar el objeto en cuestión como sistema, analizando la estructura, sus componentes y relaciones funcionales.

Luego de analizar los principales firmwares que soportan G-Code: Marlin, Sprinter, grbl. Se instaló grbl en su versión 1.1 por ser de código abierto y soportar las funciones básicas sobre la máquina en cuestión. Este, puede ser ejecutado sobre una placa arduino uno y es de fácil configuración. Se utilizó Universal G-Code Sender 2.0 para el envío de los comandos de control entre la plataforma y el ordenador. Para generar G-Code a partir de la pieza que se quiere mecanizar se usó Inkscape en su versión 0.92.4. Se creó una plataforma compuesta por una estructura física recuperada de una fresadora CNC en desuso a la que se le integró una tarjeta controladora basada en hardware abierto específicamente arduino uno r3. Para la selección de esta placa controladora se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: costo, cantidad de entradas, cantidad de salidas, volajes de funcionamiento, capacidad de procesamiento (memoria, velocidad, arquitectura), compatibilidad con los firmwares existentes. Entre las alternativas a escoger se encontraban: Esp32, Raspberry, arduino nano, arduino uno, arduino mega y arduino due.

Siendo las siguientes características las más notables que definieron la elección:

- a) El precio no es elevado.
- b) La cantidad de entradas y salidas que posee se ajustan perfectamente a la cantidad de señales que se necesitan manejar en la máquina CNC.
- c) El voltaje de funcionamiento es 5v, valor bastante estándar y las señales manejadas por los drivers controladores que se encuentran instalados en la estructura de la CNC son compatibles con estos niveles.
- d) Posee buena potencia de procesamiento y es compatible con grbl por tanto puede interpretar G-Code.

Una vez analizada la hoja de datos de los controladores electrónicos de los motores de paso de la estructura física se identificaron los pines de conexión, los niveles de voltajes y los tipos de señales necesarias para su funcionamiento.

Luego se analizó el código fuente del firmware grbl para entender cómo se integra con arduino uno y así determinar cuáles son los pines de entrada y salidas utilizar para emitir y recibir cada señal de control. De esta forma fue posible vincular estas señales con los controladores electrónicos que comandan los motores de la CNC haciendo las conexiones eléctricas necesarias. Una vez instalado el firmware grbl en arduino y vinculado este con la electrónica de



la CNC llegó en momento de configurar los parámetros necesarios para que la máquina funcionara adecuadamente. Los principales parámetros tenidos en cuenta fueron:

1. Pasos por milímetros, para desplazar la herramienta de trabajo una cantidad de milímetros en cada eje de coordenada el motor de paso respectivo debe recibir una serie de pulsos que se traducen a una cantidad de pasos.
2. Aceleración, hace referencia a cuanta aceleración se puede aplicar en un movimiento hasta alcanzar la velocidad de trabajo. El peso de la herramienta, potencia de los motores y tipo de trabajos a realizar deben ser tenidos en cuenta para definir este parámetro.
3. Velocidad de trabajo, define la velocidad máxima a la que se moverá la herramienta de trabajo para realizar los mecanizados. A menudo se denomina como avance y aunque es un parámetro muy importante es solo una parte de las condiciones generales de trabajo. Estas, están influenciadas por muchos factores fijos, como el material que se está maquinando, su forma y condición. También están influenciadas por condiciones como las capacidades de la herramienta CNC, selección de herramientas, método de configuración, profundidad y ancho de los trabajos, además de velocidades de husillo (Peter, 2018).

Luego de esto se pudo comprobar que el sistema funcionaba correctamente y se procedieron a realizar un conjunto de pruebas para analizar más a fondo como se comportaba cada una de las partes.

Resultados y discusión

A partir de una estructura CNC en desuso por obsolescencia del software y por falta de soporte se creó una nueva estructura usando hardware y software abierto. Fue empleado arduino uno r3, grbl 1.1, Universal G-Code Sender 2.0 e Inkscape 0.92.4. Se comprobó que la plataforma obtenida fuera totalmente funcional y pudiera cumplir con las funciones para las que originalmente fue diseñada e incluso podía usarse para trabajos de otro tipo.

Muchos factores impiden el correcto trabajo de una máquina CNC, incluso cuando se registran con precisión los movimientos en el programa de control. Las deformaciones elásticas y térmicas de los elementos de la máquina CNC, realmente están presentes durante el trabajo con metal y cada máquina tiene sus propias características individuales. Como regla general, para establecer las leyes que rigen la formación de posibles desviaciones durante el procesamiento de una pieza, es necesario realizar muchas pruebas, lo cual es muy difícil en el entorno de producción (Shumeyko et al., 2019). Teniendo en cuenta que la plataforma físicamente se encontraba en buen estado se creyó necesario omitir estas pruebas así como las de ortogonalidad, sensores, pérdidas de pasos de los motores y consumo de corriente de los mismos. En su lugar se realizaron pruebas para comprobar el correcto funcionamiento del



firmware y el resto del software. Esto permitió resetear los parámetros de configuración para lograr un óptimo funcionamiento de la máquina.

A continuación, se describen los parámetros más importantes que fueron modificados. Primeramente se detectaron los pines de salida usados por el arduino para manejar los motores de paso. Para observar las señales enviadas por el software de control desde la placa arduino hacia los controladores de los motores se realizan pruebas de comunicación. En la tabla 1 se muestra el resultado donde se determinó cada señal de control con su respectivo pin de salida.

Tabla 1. Pines de salida de señales de control de la placa arduino uno hacia los controladores de los motores.

	Pin de salida del arduino
Señal para avanzar un paso en el eje X	D2
Señal para avanzar un paso en el eje Y	D3
Señal para avanzar un paso en el eje Z	D4
Señal para indicar la dirección de movimiento en el eje X	D5
Señal para indicar la dirección de movimiento en el eje Y	D6
Señal para indicar la dirección de movimiento en el eje Z	D7

Seguidamente, se describen los parámetros más importantes que fueron determinados luego de realizar las pruebas de calibración. Como herramienta de trabajo se utilizó un rotulador con el que se realizó el trazado de varios polígonos de prueba, por tanto, se trabajó a la máxima velocidad soportada. Es importante destacar que para realizar tareas diferentes al rotulado de polígonos se necesitan otros tipos de herramientas que por lo general trabajan a menor velocidad. Se realizaron pruebas de funcionamiento a bajas velocidades, pero por su relevancia se decidió no incluirlas en esta investigación.

Estos son los principales parámetros modificados con sus respectivos valores. Se configuraron directamente en el firmware instalado en el arduino uno, basándose en las especificaciones de grbl (Simen, 2023):

- \$3 = 1 indica en qué sentido se debe mover cada motor cuando recibe un nivel alto o bajo en la señal de dirección.
- \$100 = 23.200 cantidad de pasos por milímetros para el eje X
- \$101 = 47.700 cantidad de pasos por milímetros para el eje Y
- \$102 = 50.000 cantidad de pasos por milímetros para el eje Z
- \$110 = 7000.000 velocidad máxima para el eje X expresada en milímetros por minutos
- \$111 = 7000.000 velocidad máxima para el eje Y expresada en milímetros por minutos
- \$112 = 200.000 velocidad máxima para el eje Z expresada en milímetros por minutos
- \$120 = 80.000 aceleración máxima para el eje X
- \$121 = 80.000 aceleración máxima para el eje Y
- \$122 = 80.000 aceleración máxima para el eje Z



Como parte de las pruebas de calibración también se realizaron tareas de corte. En la figura 2 se muestra el envío de un trabajo a la herramienta usando Universal Gcode Sender. Con esto fue posible comprobar la correspondencia entre las dimensiones de las piezas en el diseño original y las piezas cortadas.

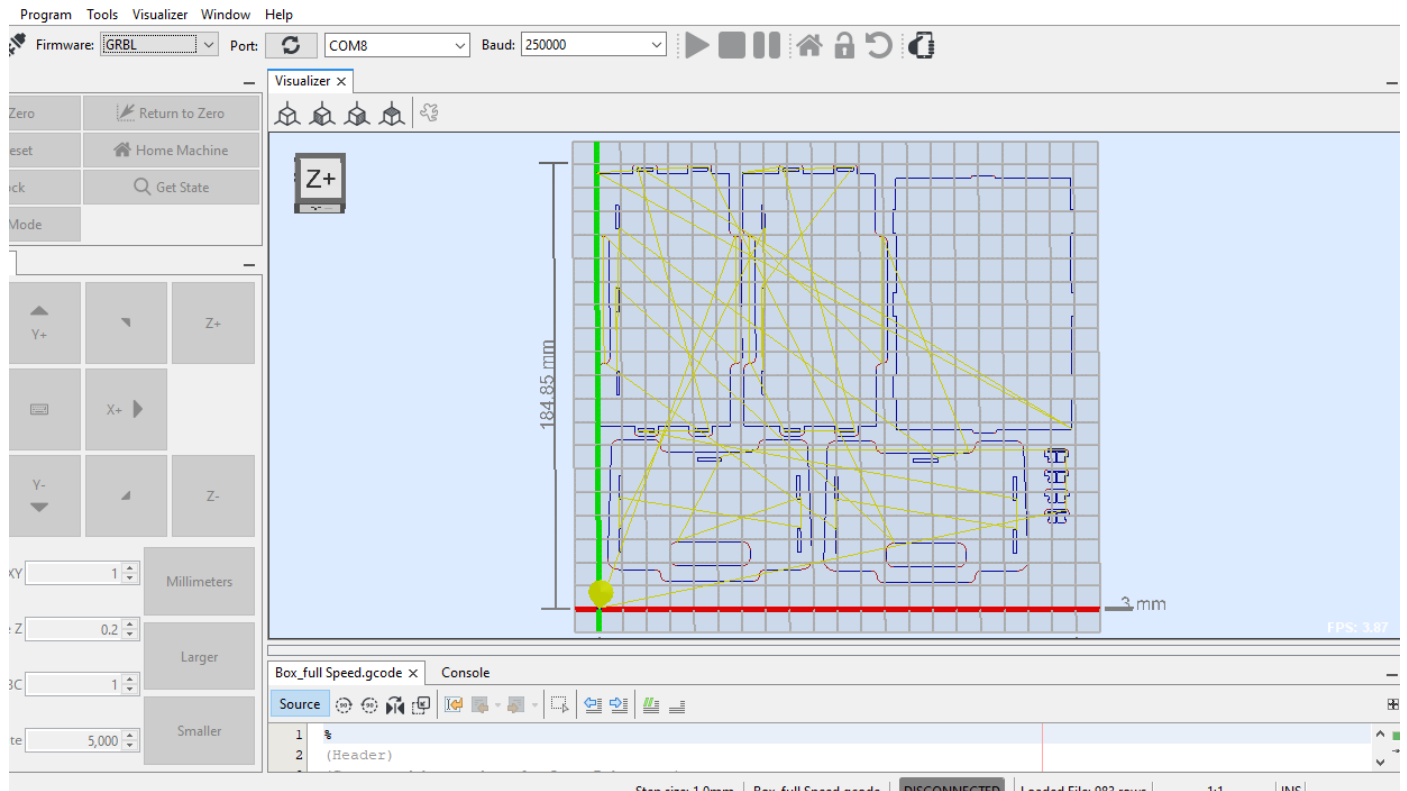


Figura 2. Trabajo de corte para ser enviado por el software Universal Gcode Sender.

En la figura 3 se muestra la fresadora CNC realizando el trabajo de corte, utilizando una herramienta rotatoria con una broca para tal fin. Se usó como material un circuito impreso en desuso al que previamente se le retiraron los componentes electrónicos. Luego de comprobar el resultado de las pruebas, con el material cortado, se construyó un gabinete decorativo para organizar materiales de oficina.



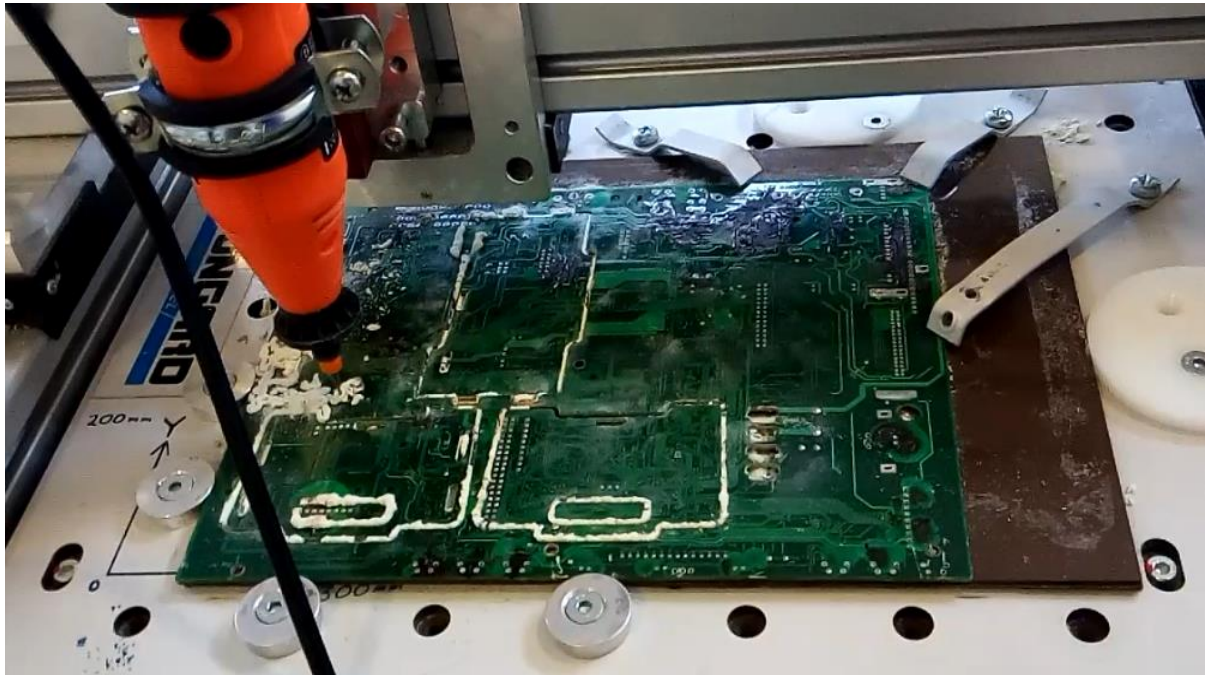


Figura 3. Realización de un trabajo de corte.

Conclusiones

Como resultado de esta investigación fue posible devolver la funcionalidad a una máquina CNC mediante la adición de un mecanismo de cambio de herramientas de trabajo y la adaptación del software de control grbl. Se realizó una adaptación para utilizar la placa controladora arduino uno r3 como el procesador principal de la máquina. Esto permitió reemplazar software privativo por software libre como Universal G-Code Sender 2.0 para enviar ordenes de trabajo a la máquina e Inkscape 0.92.4 para crear códigos de las piezas a construir a partir de los diseños originales. Se comprobó la efectividad de la utilización de software y hardware abierto. La plataforma reacondicionada permite efectuar las operaciones de perforación y corte para las que originalmente fue diseñada, se le incorporó la capacidad de cambio de herramienta de trabajo pudiendo realizar otras funciones como el grabado laser y graficado. El resultado de la investigación puede ser aplicado a otras herramientas de características semejantes.

Conflictos de intereses

Los autores de la investigación no presentan conflicto de intereses.



Contribución de los autores

1. Conceptualización: Yubismel Perdomo Velázquez
2. Curación de datos: David Batard Lorenzo
3. Análisis formal: Yubismel Perdomo Velázquez
4. Adquisición de fondos: Yubismel Perdomo Velázquez
5. Investigación: Yubismel Perdomo Velázquez
6. Metodología: Yubismel Perdomo Velázquez
7. Administración del proyecto: Yubismel Perdomo Velázquez
8. Recursos: Yubismel Perdomo Velázquez
9. Software: Yubismel Perdomo Velázquez
10. Supervisión: David Batard Lorenzo
11. Validación: David Batard Lorenzo
12. Visualización: Yubismel Perdomo Velázquez
13. Redacción – borrador original: Yubismel Perdomo Velázquez
14. Redacción – revisión y edición: David Batard Lorenzo

Financiamiento

La investigación fue financiada por los autores.

Referencias

- Divyangkumar Dharmendra Patel, Hardikkumar Rasiklal Dodiya, D.I. Lalwani. Experimental investigation of CNC machining of elliptical pockets on AISI 304 stainless steel. *Experimental Design and Process Optimisation*, 2018, 5(12):95-116
- Harish, T. Sivaprakasam, Srimathi. P, Shruthi Venkat, Yamuna. Design of Low Cost CNC Controller using Raspberry Pi. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 2017, 5:1-5
- Khan Irteqaz Iqbal, Y. U. Sathe. Design and Development of a CNC Mill Trainer by using Modern DDSCSV1 CNC Motion Controller. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 2020, 8:2-7



- Neha Chourasia, Rohit Tembhurne, Pradeep Wasnik, Shivam Londhe, Roshani Sahare, Vaibhav Mundafale. Implementation of Low Cost Cnc Plotter Using Arduino. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2018, 6(9):20-28
- Peter Smid. *CNC Control Setup for Milling and Turning*. New York, Industrial Press, 2010. 286
- Peter Smid. *CNC Programming Handbook*. New York, Industrial Press, 2007. 577
- Simen Svale Skogsrud. Grbl v1.1, [github], 2023. <https://github.com/gnea/grbl>
- Shumeyko A, V. Korotkov. Creation model for the cnc machine of technological system pliability pliability for the cnc machine. *Dnipro State Technical University Kamianske*, 2019, 2(41):185-192
- Stefan Koprda1, Zoltán Balogh, Martin Magdin, Jaroslav Reichel, György Molnár. The Possibility of Creating a Low-Cost Laser Engraver CNC Machine Prototype with Platform Arduino. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2020, 17(9):181-198
- Wikan Sakarinto, Hiroshi Narazaki, Keiichi Shirase. A Knowledge Based Model for Capturing and Managing the Knowledge of CNC Operators for Integrating CAM-CNC Operation. *Int. J. of Automation Technology*, 2011, 5(4):575-586

