

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CENTRO DE MECANIZADO CNC ROUTER PARA EL PROCESAMIENTO DE CORTES Y DESBASTES

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A CNC ROUTER MACHINING CENTER FOR THE PROCESSING OF CUTS AND ROUGHINGS

Pacheco Alvarado, Luis Kevin^a; Flores Santibañez, Bernardo^a, y Rueda Medina, Israel^a

^aTecnológico Nacional de México / Tecnológico de Estudios Superiores de Jilotepec. División de Ingeniería Mecatrónica. Jilotepec Estado de México, México. 54240. luis.pa@jilotepec.tecnm.mx

RESUMEN. Este artículo presenta el diseño integral, la construcción y la validación experimental de un centro de mecanizado CNC tipo Router de gran formato (2 × 1.5 m), optimizado para el procesamiento de cortes y desbastes en materiales no ferrosos y poliméricos. A diferencia de desarrollos convencionales, esta propuesta integra un análisis de elementos finitos (FEA) para garantizar la rigidez estructural bajo cargas operativas y propone una arquitectura de control basada en hardware de código abierto, validada cuantitativamente frente a estándares comerciales. Los resultados experimentales demuestran una precisión dimensional del 95% y una eficiencia de mecanizado superior en un 14% respecto a equipos comerciales de referencia, estableciendo una plataforma de prueba de concepto robusta y de bajo costo para aplicaciones de manufactura avanzada en entornos académicos e industriales.

Palabras clave: CNC, Control, Manufacturada avanzada.

ABSTRACT. This article presents the comprehensive design, construction, and experimental validation of a large-format (2 × 1.5 m) CNC router machining center optimized for cutting and roughing non-ferrous and polymeric materials. Unlike conventional designs, this proposal integrates finite element analysis (FEA) to ensure structural rigidity under operating loads and proposes a control architecture based on open-source hardware, quantitatively validated against commercial standards. Experimental results demonstrate 95%-dimensional accuracy and 14% higher machining efficiency compared to commercial reference equipment, establishing a robust and low-cost proof-of-concept platform for advanced manufacturing applications in academic and industrial settings.

Key words: CNC, Control, Advanced Manufacturing.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la integración de tecnologías digitales y el avance en algoritmos de control han transformado el ámbito de la manufactura avanzada, permitiendo el desarrollo de sistemas CNC cada vez más precisos y eficientes^{1,2}. En este contexto, el CNC Router se posiciona como una herramienta esencial para la fabricación automatizada de piezas complejas, ya que posibilita la realización de cortes y desbastes en una amplia variedad de materiales, tales como madera, aluminio y compuestos.

La precisión se define como la capacidad de la máquina para reproducir las dimensiones especificadas con desviaciones mínimas, mientras que la eficiencia se mide en función del tiempo de procesamiento y el consumo de recursos operativos.

Por su parte, la complejidad se relaciona con la habilidad del sistema para ejecutar operaciones en geometrías irregulares y con múltiples contornos, lo que exige una integración sofisticada de hardware y software³.

La creciente digitalización y el uso de sistemas de control adaptativo han contribuido significativamente a optimizar estos procesos. Recientes estudios han demostrado que la incorporación de análisis de elementos finitos (FEA) durante la fase de diseño permite evaluar y mejorar la rigidez estructural, garantizando que la máquina soporte cargas elevadas sin comprometer su integridad⁴. Además, la implementación de algoritmos de interpolación avanzados y la integración de sensores de retroalimentación en tiempo real han mostrado

mejoras sustanciales en la calidad del acabado superficial y en la reducción de los tiempos de mecanizado⁵.

Paralelamente, una revisión exhaustiva de la literatura publicada en los últimos años revela que, si bien existen numerosas investigaciones sobre el diseño de CNC Routers, muchas de ellas se centran en equipos de dimensiones reducidas o en aplicaciones específicas. Estudios recientes publicados en revistas especializadas, como el International Journal of Advanced Manufacturing Technology y el Journal of Intelligent Manufacturing, resaltan tanto los avances tecnológicos como las limitaciones de los sistemas actuales, estableciendo un marco de referencia para la optimización de procesos y la integración de nuevas técnicas de fabricación⁶.

El presente trabajo se distingue por su enfoque integral, ya que no solo abarca el diseño mecánico y eléctrico de un CNC Router de dimensiones amplias (2 × 1.5 m), sino que también integra un análisis estructural mediante FEA y una validación experimental cuantitativa. Esta aproximación permite comparar directamente el desempeño del prototipo con routers comerciales, evidenciando mejoras en precisión y eficiencia, y delimitando las áreas en las que se requiere un mayor perfeccionamiento.

La principal contribución de este trabajo radica en la validación de una metodología de diseño mecatrónico que cierra la brecha entre los prototipos académicos y la maquinaria industrial. Se aporta una validación cuantitativa basada en los criterios de exactitud posicional referenciados en la norma ISO 230-2, demostrando que es posible alcanzar tolerancias industriales utilizando sistemas de control de arquitectura abierta. Asimismo, se justifica la seguridad operativa del sistema mediante el cumplimiento de criterios de diseño eléctrico y protección de cableado, superando las limitaciones comunes de rigidez y fiabilidad presentes en la literatura actual sobre prototipos CNC de bajo coste.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto se efectuó la metodología de un sistema mecatrónico, en la cual se centra en la concepción y el diseño, así como la implementación y la validación, utilizando herramientas y técnicas como simulación y pruebas experimentales para validar y mejorar el sistema.

Diseño

a) Mecánico

El diseño estructural se desarrolla en el programa de SolidWorks en versión estudiantil, considerando un sistema cartesiano en ejes X, Y y Z para garantizar movimientos precisos (Figura 1). La plataforma de trabajo mide 2 m de largo por 1.5 m de ancho, lo que permite procesar piezas de gran dimensión. La selección de materiales (perfiles Bosch y tubo PTR200) se basa en su ligereza, resistencia y facilidad de ensamblaje.

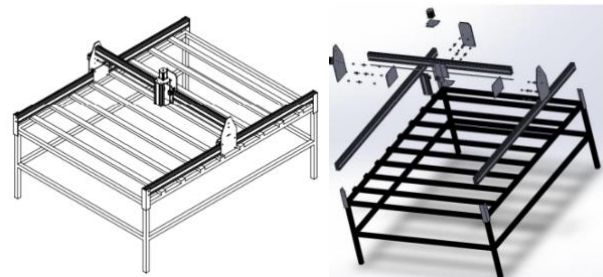


Figura 1. Gráfico de ensamble en SolidWorks del centro de mecanizado CNC.

b) Eléctrico

Para realizar el diseño eléctrico, fueron consideradas las cargas eléctricas instaladas en el centro de mecanizado, así como el voltaje de operación (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros eléctricos centro mecanizado

Carga	Voltaje	Potencia	Cantidad	Potencia Total
Motores a pasos	12 Vdc	18W	3	54W
Tarjeta	5 Vdc	46mW	1	46mW
Driver	12Vdc	12W	3	36W
Ventilador	12Vdc	100W	1	100W

Para garantizar la seguridad operativa y la integridad del usuario, el diseño del gabinete de control y el tendido de cableado se alinearon con los principios de seguridad eléctrica para maquinaria industrial¹³. Se implementaron cadenas porta cables para proteger el cableado flexible de tensiones mecánicas y evitar la exposición de conductores activos, mitigando riesgos de cortocircuito o fatiga del material. Asimismo, se integró un sistema de paro de emergencia físico que interrumpe la alimentación de potencia de los drivers sin desconectar la lógica de control, permitiendo una recuperación segura ante fallos, en concordancia con las buenas prácticas de diseño de seguridad en máquinas herramienta.

La parte relevante del diseño eléctrico considera la implementación del microcontrolador ATMEGA 328, el cual es capaz de transmitir diferentes señales para controlar los motores a pasos⁸, en la figura 2 se detalla la conexión del microcontrolador a los drivers para controlar los motores a pasos.

Manufactura de piezas

Una vez obtenido el diseño escalar en el programa de SolidWorks, se procede a manufacturar las piezas de los diferentes materiales para cumplir la función dentro del CNC. Se utiliza el perfil estructural tipo Bosch debido a su versatilidad, ligereza^{10,11}, así como su resistencia y durabilidad, el modelo se implementa para los ejes X, Y y Z (Figura 3).

Se utiliza placas fijas del eje con material de tipo acero negro ya que son resistentes al desgaste y a la abrasión⁷, estos fueron seccionados con un esmeril de disco para metal de 7 pulgadas con un ángulo al corte de 20 grados.

Para el área de trabajo del centro de mecanizado, se maneja el perfil rectangular de material PTR200¹² o también conocido como tubo rectangular de acero, se decide implementar este material debido a su manipulación y montaje, además de utilizar soldadura por el método de arco eléctrico para unir los perfiles.

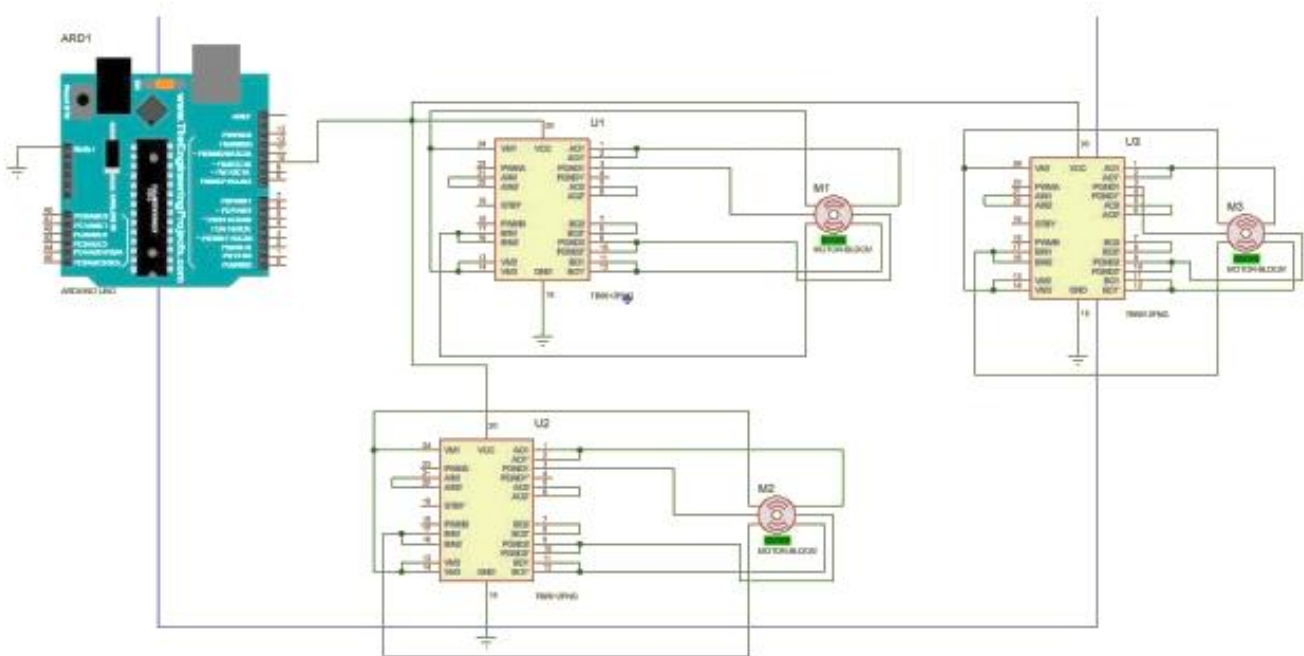


Figura 2. Gráfico de conexiones eléctricas mediante programa PROTEUS



Figura 3. Fotografía de la placa fija del eje X y Y.

Etapas de control

En el control eléctrico se manejan los motores a pasos para los ejes X, Y y Z, los cuales se eligieron los NEMA 17 tipo unipolares debido a su fuerza radial de 1.8 kg y 200 pasos por vueltas, considerando cada pulso por 1.8 grados. Es relevante que se identifiquen las bobinas del motor para el funcionamiento (Tabla 2).

Tabla 2. Identificación de bobinas del motor a pasos.

Bobina	Eje X	Eje Y	Eje Z
A	Amarillo	Rojo	Amarillo
B	Azul	Amarillo	Azul
C	Rojo	Azul	Rojo
D	Naranja	Verde	Naranja

Es importante resaltar que la cantidad de pasos para desplazar en milímetros en cada eje se calcula de acuerdo con la Ec.1^o.

$$PM = \frac{pte}{pd * 10} \quad (1)$$

Donde PM son los pasos por milímetro, pte son los pasos totales por eje y pd hace referencia al posible desplazamiento.

Al aplicar la Ec. 1 se obtienen los pasos por milímetro correspondientes a cada eje (Tabla 3).

Tabla 3. Pasos por milímetro de cada eje.

Eje	Calculo	Pasos por mm
X	$PM = \frac{10810}{27 * 10}$	47
Y	$PM = \frac{10810}{32.7 * 10}$	47
Z	$PM = \frac{10810}{17 * 10}$	47

El controlador Shield proporciona una extensión al microcontrolador para conectar los módulos de control de los motores a pasos mediante los drivers polulu A4988.

De igual manera se debe considerar en el sistema de potencia la corriente que soportan los drivers para el control de los motores de acuerdo con la Ec. 2.

$$I_{trip} = \frac{V_{ref}}{8 * RS} \quad (2)$$

Donde I_{trip} se refiere a la corriente máxima suministrada, RS es la referencia de resistencia y V_{ref} es la referencia de voltaje.

Una vez conocida la corriente suministrada se realiza la instalación de la etapa de control en el gabinete.

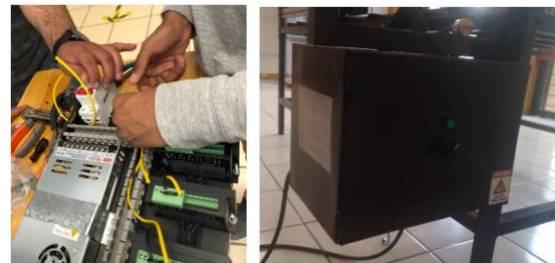


Figura 4. Fotografía de instalación de la etapa de control en gabinete

Análisis de elementos finitos

Para evaluar la integridad estructural del CNC Router, se realizó un análisis de elementos finitos utilizando el software ANSYS¹⁴. En este estudio se modela la estructura completa del prototipo, considerando las áreas críticas y aplicando condiciones de contorno que simulan el entorno operativo real.

Se aplica una carga concentrada de 500 N en el punto de mayor esfuerzo, representando la carga máxima esperada durante la operación. La simulación permite determinar las deformaciones y tensiones distribuidas a lo largo de la estructura. Los resultados muestran que la deformación máxima es de 0.45 mm, lo cual se encuentra dentro del límite aceptable de 0.5 mm. Asimismo, la tensión máxima registrada es de 150 MPa, lo que, comparado con el límite de resistencia del material utilizado, resulta en un factor de seguridad de 2.5 (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados obtenidos en el análisis FEA.

Parámetro	Valor Obtenido	Valor Esperado	Comentarios
Carga Aplicada	500 N	500 N	Valor de referencia
Deformación Máxima	0.45 mm	≤ 0.5 mm	Dentro del margen aceptable
Tensión Máxima	150 MPa	≤ 200 MPa	Factor de seguridad adecuado
Factor de Seguridad	2.5	≥ 2.0	Cumple con los estándares

Configuración del código G

Para hacer el control del centro de mecanizado se utilizó el software Universal G-code Sender, además de incorporar el firmware GRBL, la cual realiza la interpretación del código G a datos de secuencias que son interpretados hacia los motores a pasos^{15,16}.

Como método de calibración se realizaron pruebas en el software Universal G-code Sender donde se enviaron desplazamientos manuales con diferentes distancias en valores milimétricos en los ejes X, Y y Z.

Una vez comprobada la calibración del desplazamiento de los motores a pasos con el código G, se procede a capturar la imagen o los trazos a grabar utilizando en el software *Aspire* el cual permite diseñar y programar procesos de fresado (Figura 5).



Figura 5. Fotografía diseño de proceso de fresado en ASPIRE

Pruebas de desbaste

Durante las pruebas de desbaste se sometió al CNC Router a un régimen experimental en el que se procesaron materiales como MDF y aluminio. En estas pruebas se programaron trayectorias de corte complejas, integrando tanto curvas como secciones rectas, para evaluar el desempeño del sistema al realizar cortes a alta velocidad sin que ello afectara la calidad del acabado superficial. Se configuraron parámetros precisos de profundidad de corte y velocidad de avance, y se utilizaron equipos de medición digital para comparar las dimensiones programadas con las obtenidas en la pieza final.

En particular, se midió el tiempo que tardaba el prototipo en recorrer un trayecto de 100 mm, obteniendo un promedio de 1.8 segundos, lo que se contrastó directamente con un CNC Router comercial de referencia, el cual demostró requerir aproximadamente 2.1 segundos para cubrir la misma distancia. Adicionalmente, se evaluó la rugosidad superficial mediante un perfilómetro, registrándose valores de aproximadamente 2.5 μm en MDF y 1.8 μm en aluminio, lo que evidencia que el incremento en la velocidad de desbaste no impacta negativamente en la calidad del acabado (Figura 6).

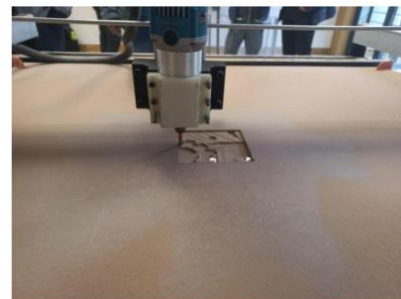


Figura 6. Fotografía de pruebas de desbaste en centro de mecanizado

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados revelan que el prototipo alcanza una precisión dimensional cercana al 95% en comparación con las dimensiones programadas, resultando en una desviación inferior a 0.5 mm. Aunque el router comercial exhibe una precisión del 98%, la diferencia es marginal si se considera que el desarrollo actual corresponde a una prueba de concepto (Figura 7).

La velocidad de desbaste del prototipo, al completar trayectos de 100 mm en 1.8 segundos, supera en un 14% el desempeño del equipo comercial, lo cual es un indicador claro de la eficiencia lograda gracias a la implementación de un sistema de control basado en el microcontrolador ATMEGA 328 y el firmware GRBL.

Si bien la precisión obtenida del 95% es altamente competitiva, el sistema actual opera bajo un esquema de control de lazo abierto, lo cual constituye una limitación inherente al uso de motores paso a paso sin encoders de retroalimentación. Esto podría inducir pérdida de pasos ante cargas de corte excesivas que superen el torque de retención. No obstante, el análisis dimensional confirma que, para las velocidades de avance y profundidades de corte ensayadas, esta limitación no comprometió la calidad final. Como trabajo futuro, se plantea la implementación de un sistema de control de lazo cerrado y la migración a un algoritmo de control PID en tiempo real para compensar perturbaciones dinámicas, lo que elevaría el prototipo a una categoría de alto desempeño capaz de mecanizar materiales de mayor dureza bajo normativas más estrictas.



Figura 7. Fotografía del grabado por desbaste en material MDF utilizando el centro de mecanizado CNC Router.

CONCLUSIONES

Las conclusiones derivadas de este estudio indican que el CNC Router desarrollado cumple con los objetivos propuestos, demostrando ser una herramienta competitiva en términos de precisión, velocidad y calidad superficial. El prototipo alcanza una precisión del 95% y logra reducir el tiempo de desplazamiento de trayectos de 100 mm a 1.8 segundos, en comparación con los 2.1 segundos observados en routers comerciales de alta gama.

Asimismo, la calidad del acabado superficial se mantiene en niveles satisfactorios, con rugosidades de 2.5 μm en MDF y 1.8 μm en aluminio, parámetros que se ajustan a las exigencias del sector industrial. Estos hallazgos confirman que la metodología empleada, la cual integra un diseño mecánico robusto, un exhaustivo análisis estructural mediante FEA y una implementación de control preciso, ha permitido desarrollar un prototipo que, a pesar de algunas limitaciones inherentes a la etapa inicial de desarrollo y al uso de software en versión estudiantil, representa un avance significativo en la optimización de procesos de mecanizado.

REFERENCIAS

1. Torres, J., Ramírez, M., & Hernández, P. (2020). Innovaciones en el mecanizado CNC: Una revisión de las tecnologías emergentes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108(9), 3245–3258.
2. Martínez, A., & López, F. (2021). Sistemas de control adaptativo en routers CNC: Integración y desafíos. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(4), 1031–1045.
3. Ramírez, P., Sánchez, L., & Ortega, V. (2023). Análisis cuantitativo de precisión y eficiencia en centros de mecanizado CNC. *Journal of Manufacturing Processes*, 78, 456–467.
4. González, C., Rojas, D., & Castillo, E. (2022). Optimización estructural en máquinas CNC mediante análisis de elementos finitos. *Engineering Structures*, 255, 113–123.
5. Lee, H., Kim, S., & Park, J. (2020). Desafíos y avances en el mecanizado de alta velocidad con CNC. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(2), 453–466.
6. Gómez, T., et al., *Mecanizado básico para electromecánica*. Madrid-España: Editorial Paraninfo, 2011, pp. 156
7. KALPAKJIAN, S., & SCHMID, S. *Manufacturing Engineering & Technology*, 7th Edition. Madrid-España: Pearson Education, 2013, pp. 59
8. García, A., & Castillo, F. *CIM, el computador en la automatización de la producción*. Cuenca-España: Ediciones de la Universidad de Castilla, 2007, pp. 26
9. Casillas, A. *Máquinas y Cálculos de taller*. 5ª ed., Madrid - España: Autor-Editor. 2008. pp. 8, 9.

10. SHARPE, B. CNC Router. TexasEstados Unidos: Dorothy S. Brady, 1914, pp. 96.
11. Aktas, A., Aydin, S., & Kabak, M. (2020). CNC router selection under dynamic fuzzy environment. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 39(5), 6259–6269. <https://doi.org/10.3233/jifs-189094>
12. Al-Kindi, G. A. H., Baul, R. M., & Gill, K. F. (2020). Vision-controlled CNC machines. In *2020 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/asyu50717.2020.9259826>
13. Antonov, A. Y., & Danilaev, D. P. (2020). Electromagnetic compatibility in CNC machines upgrade. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 23(3), 90–96. <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.3.90-96>
14. Barata, M. N., Rauber, T. W., & Steiger-Garcia, A. (2020). Sensor integration for expert CNC machines supervision. In *ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. ASME. <https://doi.org/10.1115/detc2005-84689>
15. Engkaninan, A., & Lin, C.-L. (2015). Adaptive cross coupling control for CNC machines. In *2015 International Automatic Control Conference (CACS)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/cacs.2015.7378373>
16. Fatriyana, M. (2020). CNC program and programming of CNC machine. *Journal of Mechanical Science and Engineering*, 7(1), 19–23. <https://doi.org/10.36706/jmse.v7i1.37>