



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
CONTROL MULTITARJETA PARA MAQUINARIA CNC DE
BAJO COSTO ORIENTADA A PRACTICAS ACADÉMICAS
EN ZONAS RURALES**

Luis Ernesto Cano Sepulveda

Institución Universitaria Pascual Bravo

Facultad, Departamento Mecanica

Ciudad, Colombia

2025

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
CONTROL MULTITARJETA PARA MAQUINARIA CNC DE
BAJO COSTO ORIENTADA A PRACTICAS ACADÉMICAS
EN ZONAS RURALES**

Luis Ernesto Cano Sepulveda

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Tecnologo en Mecánica Industrial

Director(a):
MSc. Julian Mora Orozco

Línea de Investigación:
Investigación hacia innovación y el desarrollo tecnológico
Grupo de Investigación:
R3

Institución Universitaria Pascual Bravo
Facultad, Ingeniería Mecánica
Ciudad, Colombia

2025

“Dedico esta obra a mi madre, María Eucaris Sepúlveda Estrada, cuyo espíritu incansable ha sido un faro en cada etapa de mi vida. Su capacidad para levantarse ante las adversidades, permanecer firme frente a las dificultades y brindarme siempre una palabra de ánimo ha sido una enseñanza permanente. Gracias a su dedicación, comprensión y amor sincero, aprendí a valorar el estudio, la disciplina y la importancia de crecer como ser humano. Cada paso que doy lleva consigo el reflejo de todo lo que me regaló con su ejemplo y su fortaleza.

Extiendo también esta dedicatoria a mi padre, Luis Enrique Cano, quien ha sido una guía constante y un modelo de perseverancia. Su manera de enfrentar la vida con esfuerzo y honestidad ha dejado en mí lecciones que trascienden lo académico. Con su trabajo incansable y su compromiso por brindar lo mejor a nuestra familia, me enseñó el valor del sacrificio, la integridad y la responsabilidad. Su forma de ver el mundo, basada en el respeto y el cumplimiento de los deberes, ha sido clave en mi desarrollo personal y profesional.

Dedico igualmente este logro a mi hija, María Camila Cano Álvarez, la razón más profunda que tengo para seguir luchando y mejorar cada día. Su presencia llena mi vida de esperanza, entusiasmo y propósito. Ella es mi fuente constante de motivación, mi impulso para no rendirme y la inspiración que me recuerda que cada meta alcanzada tiene un significado más grande cuando se hace pensando en quienes amamos. Cada logro obtenido lleva su nombre, porque es para ella que deseo construir un futuro lleno de oportunidades y bienestar.

A mis hermanos y hermana, quienes han sido compañeros indispensables en este recorrido, les dedico también parte de este logro. Junto a ellos aprendí el valor del respeto, la honestidad y la responsabilidad, principios que han guiado cada una de mis decisiones. Su lealtad incondicional, su confianza en mis capacidades y su disposición para acompañarme en los momentos más complejos han fortalecido mi carácter. De ellos he recibido más que apoyo: he recibido

enseñanzas de unión, empatía y solidaridad que hoy forman parte esencial de mi identidad y de la persona en la que me he convertido.

Y, sin olvidarme de mi abuela paterna, quien ha sido como una madre para cada uno de los integrantes de nuestra familia, deseo dedicarle unas palabras llenas de agradecimiento. Ella es el espejo de una generación de seres humanos incansables, fuertes y profundamente entregados a los suyos. Su manera de brindar siempre algo de sí con cada gesto de cariño ha dejado huellas imborrables en nuestro hogar y ha sido un pilar silencioso pero indispensable en mi camino."

A cada uno de ellos, pilares fundamentales en mi historia, ofrezco con sinceridad y gratitud la culminación de este proceso, que no habría sido posible sin su apoyo, compañía y amor incondicional.

Luis Ernesto Cano Sepulveda

Agradecimientos

Agradezco profundamente al profesor Julián Mora Orozco, pilar esencial en el desarrollo de este proyecto y asesor comprometido de mi trabajo de grado. Su orientación desde la Institución Universitaria Pascual Bravo fue determinante para la programación, la estructuración del software CAM y la consolidación de la parte mecánica. Su acompañamiento constante, su rigor académico y su disposición para compartir conocimiento hicieron posible la solidez técnica y metodológica de este trabajo.

Al profesor Carlos Mario Moreno, docente de la Institución Universitaria Pascual Bravo, también un agradecimiento sincero por su valioso acompañamiento en el diseño del control numérico y en la definición de la arquitectura eléctrica y electrónica del proyecto. Su guía fue determinante para la correcta elección de los componentes y para garantizar la funcionalidad del equipo final. Su experiencia, disposición y claridad técnica aportaron un soporte fundamental para el desarrollo integral de esta propuesta.

Extiendo un agradecimiento especial a Javier de Jesús Mejía, líder del laboratorio de Mecánica, cuya orientación ha sido invaluable para estudiantes como yo. Su apoyo constante y su motivación para impulsarnos a superar nuestros propios límites marcaron profundamente este proceso. Participó activamente en la parte mecánica, en los momentos de repotenciación de la máquina y en las pruebas realizadas, aportando siempre su experiencia y confianza para fortalecer cada etapa del proyecto.

Resumen

El proyecto de repotenciación del torno CNC EMCO Compact 5 tuvo como propósito modernizar un equipo académico con limitaciones tecnológicas, mejorando su funcionalidad, confiabilidad y adecuación a los requerimientos actuales de la formación en procesos de manufactura. La intervención se centró en la actualización del sistema de control, la optimización de componentes electrónicos y la adecuación mecánica del torno, permitiendo recuperar sus capacidades operativas y fortalecer su desempeño en términos de precisión, estabilidad y repetibilidad durante las prácticas de mecanizado.

Desde el enfoque pedagógico, el torno repotenciado se consolidó como una herramienta didáctica que favorece el aprendizaje práctico, permitiendo que los estudiantes comprendan de manera más clara la arquitectura del sistema CNC, la programación de trayectorias, el ajuste de parámetros de corte y su relación directa con la calidad superficial de las piezas. Además, el proyecto evidencia que la modernización de maquinaria existente representa una alternativa viable y sostenible frente a la adquisición de nuevos equipos, optimizando recursos institucionales y fortaleciendo la infraestructura tecnológica del laboratorio.

En conjunto, esta experiencia no solo impacta positivamente el rendimiento técnico del equipo, sino que también contribuye a la formación integral de los futuros profesionales, al proporcionar un entorno de aprendizaje más cercano a las condiciones reales de la industria y promover competencias en automatización, control y manufactura avanzada.

Palabras clave – Repotenciación, Torno CNC, EMCO Compact 5, Manufactura avanzada, Automatización industrial, Procesos de mecanizado, Formación académica

Abstract

The repowering of the EMCO Compact 5 CNC lathe aimed to modernize an academic machine that had technological limitations, enhancing its functionality, reliability, and suitability for current manufacturing education requirements. The intervention focused on upgrading the control system, optimizing electronic components, and improving mechanical performance, allowing the recovery of its operational capabilities and strengthening its precision, stability, and repeatability during machining practices.

From a pedagogical perspective, the repowered lathe became an effective teaching tool that promotes hands-on learning, enabling students to better understand CNC system architecture, toolpath programming, cutting parameter adjustment, and their direct relationship with surface quality and dimensional accuracy. Additionally, the project demonstrates that upgrading existing machinery represents a viable and sustainable alternative to acquiring new equipment, contributing to cost optimization and the strengthening of institutional technological infrastructure.

Overall, this experience not only improved the technical performance of the machine but also supported the comprehensive training of future professionals by providing a learning environment closely aligned with real industrial conditions and fostering competencies in automation, control, and advanced manufacturing systems.

Keywords – Retrofitting, CNC Lathe, EMCO Compact 5, Advanced Manufacturing, Industrial Automation, Machining Processes, Technical Education

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	IV
Abstract	V
1. Introducción	1
1.1. Identificación y descripción del problema	1
1.2. Justificación	2
1.3. Hipótesis y pregunta de investigación	3
1.4. Objetivos del trabajo de grado	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
2. Marco Teórico	5
2.1. Revisión de la literatura	5
2.2. Bases teóricas	6
2.2.1. Concepto de repotenciación	6
2.2.2. Torno CNC y control numérico computarizado	6
2.2.3. Mantenimiento predictivo y vida útil de las máquinas-herramienta	7
2.2.4. Modelos de implementación tecnológica en entornos rurales	7
2.2.5. Transferencia de conocimiento y sostenibilidad	7
2.2.6. Integración de Software CAD y CAM en la Tecnología CNC	7
2.2.6.1. Software CAD (Diseño Asistido por Computadora)	8
2.2.6.2. Software CAM (Manufactura Asistida por Computadora)	10
2.2.6.3. Integración CAD/CAM en la Manufactura CNC	11
2.2.7. Movimientos y Control de Ejes en un Torno CNC	12
2.2.8. Virtualización y Programación CAM	13
2.2.9. Automatización de Máquinas-Herramienta	13
2.2.9.1. Microcontroladores	13
2.2.9.2. Drivers de Potencia	15
2.2.9.3. Software de Control CNC	17
2.2.9.4. Sistemas Multitarjeta en Automatización	18
3. Metodología	19
3.1. Fase 1: Revisión e inspección de la máquina y selección de componentes	20
3.1.1. Revisión técnica del torno	20
3.1.2. Desarme de los Componentes Críticos del Equipo	21

3.1.3.	Revisión de Tuercas y Tornillos de Bolas Recirculantes del Carro Longitudinal y transversal	21
3.1.4.	Revisión del Motor del Husillo Principal	21
3.1.5.	Revisión de Poleas de los Carros Transversal y Longitudinal	22
3.1.6.	Plan de Mantenimiento del Torno EMCO COMPACT 5	23
3.1.7.	Documentación del estado de componentes	24
3.1.8.	Selección de componentes tecnológicos	27
3.1.8.1.	Motor Paso a Paso NEMA 23 (1.8 N·m)	27
3.1.8.2.	Tarjeta de Control Mach3 (4 Ejes) – Aplicación en Ejes X y Z	28
3.1.8.3.	Drivers de Potencia para Motores Paso a Paso	30
3.1.8.4.	Placa ESP32 como Sistema Embebido Auxiliar	31
3.2.	Fase 2: Diseño e integración del sistema	33
3.2.1.	Diseño de la Arquitectura de Control y la Interfaz de Usuario	34
3.2.1.1.	Diseño de la Arquitectura de Control	34
3.2.1.2.	Diseño de la Interfaz de Usuario	38
3.2.2.	Definición de Protocolos de Comunicación	39
3.2.3.	Creación del modelo 3D, cinemática y postprocesador CAM	40
3.2.3.1.	Beneficios del modelado y virtualización	40
3.2.3.2.	Etapas de Creación del Modelo Cinemático (Modelado y Definición Cinemática)	40
3.2.3.3.	Modelado de Componentes de Máquina	41
3.2.3.4.	Creación y Definición de la Cinemática Básica	44
3.2.3.5.	Configuración de Matrices de Transformación	45
3.2.3.6.	Etapas de Pruebas de Operación y Depuración	45
3.2.3.7.	Carga, Setup y Depuración del Simulador	46
3.2.3.8.	Pruebas de Operación Final	48
3.2.3.9.	Etapas de Edición del Postprocesador	50
3.3.	Fase 3: Pruebas funcionales y recolección de datos	51
3.3.1.	Evaluación práctica del sistema	51
3.3.2.	Resumen de pruebas	52
3.3.2.1.	Instrumentos de medición	52
3.3.2.2.	Protocolo de validación	56
3.3.2.3.	Identificación de fallos	59
3.3.2.4.	Tratamiento de la información	62
3.4.	Cronograma de actividades	64
4.	Análisis	66
4.1.	Análisis y validación del sistema	66
4.1.1.	Manufactura CNC	67
4.1.2.	Estrategias de manufactura	67
4.1.3.	Estrategia metodológica	67
4.1.4.	Estrategia pedagógica	67
4.1.5.	Resultados de aprendizaje	68
4.1.6.	Etapas de la actividad	68
4.1.7.	Productos a entregar	68
4.1.8.	Rúbrica de evaluación	69
4.1.9.	Forma de entrega	69
4.1.10.	Observaciones finales	70
4.2.	Desarrollo de la Práctica	70
4.2.1.	Etapas 1: Análisis inicial de la pieza	70

4.2.2.	Etapa 2: Generación del proceso CAD/CAM	71
4.2.3.	Etapa 3: Preparación del equipo y material	77
4.2.4.	Etapa 4: Ejecución del mecanizado	77
4.2.5.	Etapa 5: Montaje y control de calidad	78
4.2.5.1.	Resumen estadístico (15 piezas)	79
4.2.6.	Etapa 6: Registro de tiempos y desplazamientos	80
4.2.6.1.	Resultados estadísticos del lote	81
4.2.6.2.	Análisis	81
4.2.7.	Etapa 7: Documentación final	81
4.3.	Evaluación de viabilidad	82
4.3.1.	Validación pedagógica	82
5.	Discusión	84
5.1.	Discusión	84
6.	Conclusiones y recomendaciones	86
6.1.	Conclusiones	86
6.2.	Recomendaciones	87
	Referencias	88
	Apéndices	90

Índice de cuadros

3.1.1.Fase 1. Revisión e inspección de la máquina y selección de componentes	20
3.1.2.BoM – Sistema Bancada	24
3.1.3.BoM – Cabezal y Husillo	24
3.1.4.BoM – Sistema de Transmisión	25
3.1.5.BoM – Sistema de Sujeción (Plato)	25
3.1.6.BoM – Eje Z (Carro Longitudinal)	25
3.1.7.BoM – Eje X (Carro Transversal)	26
3.1.8.BoM – Torreta Portaherramientas	26
3.1.9.BoM – Contrapunto	26
3.1.10BoM – Sistema CNC	27
3.1.11BoM – Sistemas Auxiliares	27
3.2.1.Fase 2. Diseño e integración del sistema multitarjeta	34
3.3.1.Resumen de pruebas experimentales del sistema	52
3.3.2.Parámetros de mecanizado utilizados en el protocolo de validación	58
3.3.3.Instrumentos de medición usados en la validación	58
3.3.4.Matriz de validación de parámetros vs. valores de referencia	58
3.3.5.Registro de ciclos de mecanizado	59
3.3.6.Registro de fallos por pérdidas de pasos en motores NEMA 23	61
3.3.7.Desajustes en sincronización entre ejes X y Z	61
3.3.8.Errores de comunicación entre microcontroladores	62
3.3.9.Variaciones inesperadas en consumo energético	62
3.3.10Estadísticos descriptivos (muestras — 5 ciclos)	64
3.3.11Matriz de correlación (Pearson) — variables (5 ciclos)	64
3.4.1.Cronograma de actividades	65
4.2.1.Resultados de mediciones – Ficha Parques	79
4.2.2.Estadísticos de tiempo de fabricación para 40 fichas	81

Índice de figuras

2.2.1.Torno Emco Compact 5	8
2.2.2.Maqueta virtual de torno EMCO Compact 5. Elaboración propia.	13
3.1.1.Esquema general del desarme de los componentes críticos del torno.	21
3.1.2.Conjunto de tuercas y tornillos de bolas recirculantes correspondientes a los carros longitudinal y transversal.	22
3.1.4.Inspección de las poleas asociadas a los sistemas de movimiento de los carros transversal y longitudinal.	22
3.1.3.Vista del motor del husillo principal durante el proceso de inspección.	23
3.1.5.Diagrama general del plan de mantenimiento preventivo para el torno EMCO Compact 5.	23
3.1.6.Motor paso a paso NEMA 23 utilizado para el accionamiento de los ejes del torno.	28
3.1.7.Diagrama del sistema de control Mach3 en su configuración de tarjeta roja, mostrando la distribución de señales, entradas, salidas y puertos de control.	30
3.1.8.Driver TB6600 utilizado para el control de motores paso a paso en sistemas CNC.	31
3.1.9.Módulo ESP32 utilizado para la adquisición de datos y comunicación inalámbrica en el sistema.	32
3.2.1.Panel de control CNC con identificación de módulos: SP32 (cuadro amarillo), Mach3 (cuadro verde), drivers de motores paso a paso (cuadro azul) y relés de potencia (cuadro naranja).	35
3.2.2.Plano 1. Diagrama eléctrico del torno CNC EMCO, mostrando la integración de la fuente de alimentación 110VAC–30VDC, drivers de los ejes X y Z, y conexión de motores paso a paso.	36
3.2.3.Plano 2. Diagrama de control del torno CNC EMCO, detallando la distribución y conexionado del sistema de relés de 12V, la bornera de conexión y la interfaz de alimentación DC/DC.	36
3.2.4.Plano 3. Diagrama de la tarjeta de control e interfaz USB del torno CNC EMCO, mostrando la disposición de pines de entrada/salida y su conexión con el sistema de control mach3.	37
3.2.5.Panel frontal selector de tarjetas del torno EMCO CNC (Elaboración propia).	38
3.2.6.Interfaz de control Bluetooth para el sistema XYZ (Elaboración propia).	39
3.2.7.Interfaz del software MachineMaker	41
3.2.8.Importación de las geometrías del torno	41
3.2.9.Modelado de componentes EMCO. Elaboración propia	42
3.2.10Alineación del ensamblaje. Elaboración propia	43
3.2.11Guardado de imágenes. Elaboración propia	43
3.2.12Creación de la cinemática. Elaboración propia	44
3.2.13Matrices de transformación. Elaboración propia	45
3.2.14Configuración de la pieza y el material en bruto. Elaboración propia	46

3.2.15	Creación de las operaciones. Elaboración propia	46
3.2.16	Validación de los límites de máquina ?	47
3.2.17	Pruebas de setup en SprutCAM. Elaboración propia	47
3.2.18	Cero de pieza. Elaboración propia	48
3.2.19	Creación del código G postprocesado. Elaboración propia	49
3.2.20	Verificación del código en el control Mach3. Elaboración propia	49
3.2.21	Validación en máquina. Elaboración propia	50
3.2.22	Ajustes del postprocesador. Elaboración propia	50
3.3.1	Montaje del comparador de carátula sobre el carro del torno EMCO Compact 5 CNC para verificación de alineación (Elaboración propia).	54
3.3.2	Proceso de soldadura y comprobación eléctrica en el motor del torno durante la repotenciación (Elaboración propia).	56
4.1.1	Rúbrica de evaluación para la actividad de manufactura.	69
4.2.1	Plano técnico de la ficha utilizada en el proceso de manufactura. Adaptado de documentación del laboratorio de manufactura, Institución Universitaria Pascual Bravo (2025).	70
4.2.2	Modelo CAD de la ficha.	71
4.2.3	Envío del modelo CAD a la interfaz del software CAM.	71
4.2.4	Ubicación del material en bruto y establecimiento del cero de pieza en el entorno CAM.	72
4.2.5	Herramientas físicas y parámetros de corte configurados para el proceso de torneado CNC.	72
4.2.6	Parámetros de corte configurados en el entorno CAM para la generación de trayectorias.	73
4.2.7	Velocidades de corte configuradas en el entorno CAM durante la definición de las trayectorias.	73
4.2.8	Estrategia de refrentado definida en el entorno CAM para la primera operación de mecanizado.	74
4.2.9	Estrategia de desbaste y perfilado configurada en el entorno CAM mediante la operación <i>OD Roughing</i>	74
4.2.10	Simulación del proceso de remoción de material en la maqueta virtual del entorno CAM.	75
4.2.11	Generación del código G mediante el proceso de postprocesado en el software CAM.	76
4.2.12	Hoja de proceso correspondiente a las operaciones definidas para la manufactura de la ficha.	76
4.2.13	Preparación del torno físico antes de la ejecución del proceso de mecanizado.	77
4.2.14	Ejecución del maquinado en el torno CNC durante la fabricación de la pieza.	77
4.2.15	Vista general de las Fichas fabricadas y utilizadas en el análisis dimensional.	78
4.2.16	Imágenes de la práctica realizada.	82

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad, la evolución de la maquinaria CNC, como tornos y fresadoras, ha estado marcada por el impulso de nuevas tecnologías, la innovación en los procesos y las crecientes demandas del mercado moderno. Estos avances han permitido alcanzar mayores niveles de calidad y precisión en el mecanizado de piezas, consolidando la manufactura como un sector clave para la competitividad industrial.

Sin embargo, al intentar acceder a este tipo de recursos tecnológicos se evidencia una marcada brecha entre los sectores urbanos y rurales. Mientras que en las ciudades existen mayores oportunidades de aprendizaje y formación en tecnología CNC, en las zonas rurales el acceso suele ser limitado debido a restricciones económicas, técnicas y pedagógicas. Esta desigualdad dificulta la apropiación del conocimiento y restringe las oportunidades educativas de los estudiantes en dichos contextos.

Hoy en día, la tecnología CNC (Control Numérico Computarizado) se ha consolidado como un pilar esencial para los procesos de mecanizado de alta precisión, mejorando tanto la eficiencia como la calidad en la industria manufacturera. No obstante, en las comunidades rurales persiste una brecha tecnológica que impacta negativamente en la productividad y en las oportunidades de formación técnica, debido a la escasa disponibilidad de maquinaria moderna y a los elevados costos de adquisición, instalación y mantenimiento.

1.1. Identificación y descripción del problema

En este escenario surge una alternativa viable: la modernización del torno EMCO Compact 5. A pesar de su antigüedad, esta máquina cuenta con una estructura mecánica completamente

funcional que puede ser aprovechada para procesos educativos. Implementar un sistema de control multitarjeta de bajo costo en este torno ofrece una solución práctica y económica para acercar la tecnología CNC a las zonas rurales. De esta manera se evita la necesidad de adquirir maquinaria nueva y costosa, al tiempo que se facilita el acceso de estudiantes y aprendices a recursos tecnológicos avanzados.

Por lo tanto, el problema se concentra en tres aspectos clave:

La escasa disponibilidad de equipos CNC modernos en las zonas rurales.

Los elevados costos de adquisición y mantenimiento de nuevas máquinas.

La falta de infraestructura educativa especializada para la formación técnica.

Estas limitaciones no solo obstaculizan la mejora de los procesos de enseñanza-aprendizaje, sino que también restringen el desarrollo de proyectos productivos y dificultan la formación de técnicos calificados capaces de responder a las demandas del mercado laboral actual.

1.2. Justificación

Esta investigación surge como una respuesta a la problemática latente en las zonas rurales: la dificultad para acceder a recursos tecnológicos de manufactura moderna, como la maquinaria CNC. Esta situación se debe principalmente a los altos costos de adquisición, instalación y mantenimiento, así como a la complejidad técnica inherente a este tipo de equipos. Como consecuencia, se reduce significativamente la capacidad de formar profesionales con competencias en el manejo de estas tecnologías, limitando las posibilidades de que las comunidades rurales sean más competitivas en el ámbito productivo y educativo. Desde la perspectiva técnica y tecnológica, la investigación se centra en dar respuesta a un vacío evidente: la escasez de sistemas de control CNC que, además de garantizar precisión y funcionalidad, ofrezcan facilidad de acceso económico y adaptabilidad. En este sentido, el diseño de un sistema de control multitarjeta se plantea como una solución innovadora, modular y de fácil comprensión, que pueda adaptarse a diferentes contextos de enseñanza sin comprometer la calidad ni la operatividad del equipo. Bajo un enfoque académico, este proyecto de investigación busca aportar una alternativa viable que, además de responder a las necesidades locales, pueda ser replicable y escalable. De esta forma, se promueve la democratización del conocimiento, el uso responsable de la tecnología y la generación de nuevas oportunidades de aprendizaje en las zonas rurales.

1.3. Hipótesis y pregunta de investigación

La repotenciación del torno EMCO Compact 5, mediante la implementación de un sistema de control multitarjeta de bajo costo, incrementará la eficiencia operativa y reducirá los costos de capacitación técnica en comparación con la adquisición de equipos CNC nuevos.

Esta hipótesis se fundamenta en la evidencia de que la modernización de maquinaria existente permite aprovechar la estructura mecánica disponible, disminuir gastos de inversión inicial y facilitar la enseñanza técnica gracias a una mayor accesibilidad económica y a la posibilidad de personalizar los sistemas de control.

Pregunta de investigación

Pregunta 1 ¿Qué componentes son críticos en la repotenciación de un torno convencional hacia un sistema CNC multitarjeta?

Pregunta 2 ¿Cómo impactará la repotenciación de un torno biaxial en la enseñanza técnica en zonas rurales?

1.4. Objetivos del trabajo de grado

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de control multitarjeta para la automatización de un torno biaxial integrando tecnologías como Mach3 y ESP32 con el propósito de trasladar procesos de mecanizado CNC a zonas rurales, mejorando la eficiencia operativa, la accesibilidad tecnológica y la sostenibilidad en contextos de bajos recursos.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar los componentes y tecnologías necesarios para realizar la conversión de un torno convencional a CNC, teniendo en cuenta las limitaciones técnicas y económicas del entorno académico, con el propósito de implementar un sistema de control multitarjeta de bajo costo y viable en estos escenarios.
- Evaluar los beneficios técnicos de la mejora de un torno biaxial a un torno CNC con control multitarjeta, basado en microcontroladores como el ESP32 e interfaces compatibles con Mach3.

- Validar, mediante pruebas en el laboratorio de mecánica, la funcionalidad de la máquina, evaluando su eficiencia operativa en términos de rapidez y precisión de los movimientos.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Revisión de la literatura

Diversos estudios han abordado la modernización o repotenciación de tornos CNC como estrategia para extender la vida útil de la maquinaria y optimizar su desempeño. Por ejemplo, [Ilari et al. \(2021\)](#) describen la actualización de equipos EMCO Compact a través de controladores abiertos, mientras que [Gómez and Torres \(2019\)](#) proponen soluciones de bajo costo basadas en Arduino para entornos educativos. De igual forma, [Kaarlela \(2024\)](#) destaca la importancia de la repotenciación como alternativa económica frente a la adquisición de nuevos equipos en regiones con recursos limitados.

En el ámbito de la implementación de maquinaria CNC de bajo costo en zonas rurales, trabajos como los de [Saha et al. \(2020\)](#) y [Nassar et al. \(2022\)](#) analizan los beneficios de utilizar plataformas de código abierto para reducir costos de licenciamiento y mantenimiento. Estos estudios coinciden en que la adopción de tecnologías accesibles permite ampliar las oportunidades de formación técnica y mejorar la productividad en comunidades alejadas de centros industriales.

Respecto al mantenimiento predictivo y la prolongación de la vida útil de las máquinas-herramienta, [Saha et al. \(2020\)](#) presenta modelos basados en monitoreo de vibraciones y análisis de datos que anticipan fallas antes de que ocurran, lo que reduce los costos de operación y mejora la confiabilidad del sistema. Este tipo de estrategias es especialmente relevante en entornos rurales, donde la disponibilidad de repuestos y servicios de mantenimiento especializados es limitada [Zhang and Wang \(2021\)](#).

Finalmente, la transferencia de tecnología y conocimiento hacia talleres rurales ha sido estudiada

por Rogers (2003) en su modelo de difusión de innovaciones, el cual explica cómo las nuevas tecnologías se adoptan gradualmente según factores sociales, económicos y educativos. Sarawak Skills (2025) complementa esta perspectiva resaltando la importancia de la capacitación participativa para garantizar la sostenibilidad de los proyectos de modernización.

La literatura respalda la viabilidad técnica y la conveniencia económica del *retrofitting* como estrategia para actualizar tornos como el EMCO Compact 5. Las arquitecturas modulares y el uso de controladores *open-source* y placas económicas ofrecen rutas plausibles para desarrollar un sistema de control multitarjeta de bajo costo. No obstante, la implementación exitosa requiere atención a la sincronización en tiempo real, la robustez eléctrica y un componente formativo que garantice uso y mantenimiento locales.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Concepto de repotenciación

La repotenciación, también denominada *retrofitting*, se define como el proceso de modernizar o actualizar equipos industriales existentes con el fin de prolongar su vida útil, mejorar su desempeño y adaptarlos a nuevas exigencias productivas o tecnológicas Kaarlela (2024). Este proceso puede involucrar la sustitución de componentes electrónicos, sistemas de control, accionamientos y, en algunos casos, partes mecánicas, sin alterar la estructura básica de la máquina.

2.2.2. Torno CNC y control numérico computarizado

Un torno CNC (*Computer Numerical Control*) es una máquina-herramienta capaz de realizar operaciones de torneado mediante la ejecución de instrucciones codificadas en un programa numérico. El control numérico computarizado permite que el movimiento de los ejes, las velocidades de corte y las trayectorias de la herramienta sean gestionados automáticamente con gran precisión Ilari et al. (2021).

El **control numérico computarizado (CNC)** es una tecnología que permite automatizar máquinas-herramienta mediante la ejecución de instrucciones codificadas en un programa digital. Dichos programas definen trayectorias de corte, velocidades de avance y condiciones de operación que aseguran repetibilidad y precisión en los procesos de manufactura (Groover, 2016).

En su concepción tradicional, los sistemas CNC industriales requieren controladores propietarios

de alto costo, lo que limita su acceso en entornos académicos con restricciones presupuestales o en regiones rurales. Por ello, la investigación y el desarrollo de soluciones CNC de bajo costo se han convertido en una línea de trabajo clave dentro de la educación técnica y tecnológica (Hernández-Sampieri et al., 2014).

2.2.3. Mantenimiento predictivo y vida útil de las máquinas-herramienta

El mantenimiento predictivo es una estrategia basada en el monitoreo continuo de variables críticas (vibraciones, temperatura, desgaste, consumo eléctrico, entre otras) para anticipar fallas antes de que ocurran Guo et al. (2019). La teoría de la vida útil de las máquinas-herramienta se sustenta en modelos de fatiga de materiales y desgaste de componentes, como las curvas de fiabilidad de Weibull, que permiten decidir cuándo es más rentable repotenciar que reemplazar.

2.2.4. Modelos de implementación tecnológica en entornos rurales

La transferencia de tecnología hacia contextos rurales requiere estrategias adaptadas a limitaciones de infraestructura, costos y disponibilidad de personal capacitado. Modelos como el de difusión de innovaciones de Rogers (2003) explican la adopción progresiva de tecnologías, mientras que Sarawak Skills (2025) resalta la capacitación participativa como factor clave de sostenibilidad.

2.2.5. Transferencia de conocimiento y sostenibilidad

La transferencia de conocimiento se entiende como el proceso mediante el cual se comparten habilidades y saberes técnicos entre instituciones, empresas y comunidades. En entornos rurales, este proceso se potencia con programas de educación técnica y redes colaborativas, generando un ciclo virtuoso de formación, mantenimiento y mejora continua.

2.2.6. Integración de Software CAD y CAM en la Tecnología CNC

En la actualidad, la incorporación de tecnologías digitales en los procesos de manufactura ha transformado profundamente la forma en que se diseñan y fabrican piezas mecánicas. En este contexto, el uso de software CAD (Computer-Aided Design) y CAM (Computer-Aided Manufacturing) constituye una base esencial dentro del entorno de tecnología CNC (Control Numérico Computarizado), ya que permite establecer un flujo continuo y preciso entre el diseño conceptual y la ejecución física de los productos.



Figura 2.2.1: Torno Emco Compact 5

2.2.6.1. Software CAD (Diseño Asistido por Computadora)

El software CAD desempeña un papel fundamental en la etapa de diseño del producto, proporcionando herramientas avanzadas para crear modelos tridimensionales (3D) y representaciones bidimensionales (2D) de piezas y conjuntos mecánicos con una precisión milimétrica. Su función principal es permitir al diseñador visualizar, analizar y optimizar la geometría del objeto antes de su fabricación. De esta forma, se reducen los errores de interpretación, se minimizan los desperdicios de material y se incrementa la eficiencia en la etapa de producción.

El diseño asistido por computadora no solo permite elaborar formas complejas, sino también realizar análisis de ensamble, simulaciones de movimiento, estudios de esfuerzos, análisis térmicos y optimización topológica, aspectos que resultan vitales en la ingeniería moderna. Estos análisis garantizan que las piezas diseñadas no solo cumplan con los requisitos estéticos, sino también con las especificaciones técnicas y de desempeño exigidas por la aplicación industrial.

Entre los programas CAD más utilizados en la industria destacan:

- **SolidWorks:** ampliamente empleado en el diseño mecánico por su entorno intuitivo y su capacidad de integración con módulos de simulación y análisis estructural. Permite generar planos técnicos, animaciones y modelos paramétricos que facilitan la modificación de dimensiones sin alterar la coherencia del diseño general. [Systèmes \(2025b\)](#)

- **AutoCAD:** uno de los pioneros en el diseño asistido por computadora, utilizado tanto para dibujo técnico 2D como para modelado 3D. Su versatilidad lo convierte en una herramienta de uso común en ingeniería, arquitectura y manufactura. [Autodesk \(2025a\)](#)
- **Siemens NX y CATIA:** orientados a entornos industriales avanzados, especialmente en los sectores aeronáutico y automotriz, donde se requiere un control preciso de tolerancias geométricas, superficies complejas y ensamblajes de gran escala. [Software \(2025\)](#), [Systèmes \(2025a\)](#)
- **Fusion 360:** combina herramientas CAD, CAM y CAE en una sola plataforma en la nube, lo que permite la colaboración en tiempo real y la integración directa con sistemas de manufactura CNC. [Autodesk \(2025c\)](#)
- **Autodesk Inventor:** una de las soluciones más completas en el campo del diseño mecánico y el modelado paramétrico 3D. Este software ofrece un entorno altamente intuitivo que permite crear piezas, ensamblajes y planos técnicos de forma precisa, combinando potentes herramientas de diseño, simulación y documentación. [Autodesk \(2025b\)](#)
- **ZW3D:** software de diseño y manufactura que integra modelado híbrido sólido–superficie, permitiendo crear geometrías complejas con un alto nivel de precisión. Su enfoque en el modelado paramétrico y la gestión de ensamblajes facilita la generación de planos técnicos, simulaciones básicas y preparación de modelos para procesos CAM, convirtiéndolo en una alternativa versátil para entornos educativos e industriales. [ZWSOFT \(2025\)](#)

Entre las funciones más destacadas de los software CAD se encuentra la posibilidad de realizar análisis estructurales y funcionales de las piezas antes de su manufactura, lo que ayuda a garantizar su desempeño y durabilidad. Además, ofrecen herramientas de ensamble digital que permiten verificar interferencias, restricciones de movimiento y compatibilidad entre componentes, asegurando que el conjunto diseñado sea viable desde el punto de vista constructivo y funcional.

En relación con la tecnología CNC, los programas CAD cumplen un papel esencial como punto de partida del proceso de manufactura digital. Los modelos tridimensionales generados en estas plataformas pueden exportarse directamente a sistemas CAM mediante formatos estándar como STEP, IGES o DXF, que permiten una lectura universal del diseño. Gracias a esta integración, se asegura que las dimensiones, tolerancias y superficies diseñadas en el entorno CAD se traduzcan con precisión en las instrucciones de control numérico que ejecutará la máquina CNC.

Del mismo modo, los entornos CAD modernos incorporan herramientas de vinculación con el software CAM, que permiten realizar simulaciones del proceso de mecanizado y generar prototipos digitales antes de la fabricación real. Esta comunicación directa entre ambos entornos contribuye a reducir los tiempos de preparación, optimizar el consumo de material y minimizar el desgaste de las herramientas de corte. En consecuencia, la integración entre CAD y CAM consolida un flujo de trabajo continuo, eficiente y confiable entre el diseño ingenieril y la ejecución automatizada en máquinas CNC, garantizando productos finales de alta precisión y calidad.

2.2.6.2. Software CAM (Manufactura Asistida por Computadora)

El software CAM se encarga de transformar los modelos digitales creados en CAD en instrucciones específicas para la máquina CNC, conocidas como código G o código de control numérico. Este código define con precisión los movimientos de las herramientas de corte, las trayectorias, las velocidades de avance, las revoluciones del husillo y las profundidades de mecanizado. En otras palabras, el CAM actúa como un intérprete entre el diseño virtual y la máquina herramienta, garantizando que la pieza fabricada cumpla exactamente con las dimensiones y tolerancias establecidas en el modelo digital.

El software CAM también permite simular el proceso de mecanizado antes de su ejecución real, lo que representa una ventaja crucial en la reducción de errores, colisiones y desperdicio de material. Estas simulaciones brindan una visualización completa del comportamiento de las herramientas, optimizando la secuencia de operaciones y los tiempos de ciclo. De esta manera, se mejora la productividad del taller y se extiende la vida útil tanto de las herramientas como del equipo CNC.

Entre los programas CAM más utilizados se destacan:

- **Mastercam:** uno de los sistemas más reconocidos en la industria metalmecánica por su capacidad de generar trayectorias eficientes y optimizar procesos de torneado, fresado y corte. [LLC \(2025\)](#)
- **Fusion 360 (módulo CAM):** integra el diseño CAD y la manufactura en una misma plataforma, ofreciendo una transición directa entre el modelado y la generación del código G. [Autodesk \(2025d\)](#)
- **Edgcam:** especializado en la programación de tornos y centros de mecanizado CNC, permite definir estrategias de mecanizado para piezas de geometría compleja y soporta operaciones multieje. [Intelligence \(2025\)](#)

- **SolidCAM:** diseñado para integrarse directamente con SolidWorks, facilita la programación de piezas dentro del mismo entorno de diseño, eliminando la necesidad de exportar archivos y reduciendo los riesgos de incompatibilidad. [Intelligence \(2025\)](#)
- **Powermill:** enfocado en la manufactura de moldes, matrices y componentes de alta precisión, ofrece herramientas avanzadas de control de trayectorias para fresado de 3, 4 y 5 ejes. [Autodesk \(2025e\)](#)
- **SprutCAM:** orientado a la programación de robots y máquinas CNC, se destaca por su capacidad de simular procesos de maquinado y operaciones robóticas en un entorno unificado. Permite generar trayectorias de herramienta para fresado, torneado y mecanizado multieje, integrando postprocesadores personalizables y una visualización cinemática completa que facilita la detección de colisiones y la optimización del movimiento. [Technology \(2025\)](#)

El uso del software CAM dentro de la tecnología CNC no solo incrementa la precisión y calidad del producto final, sino que también permite la automatización total del proceso productivo, reduciendo la intervención humana y aumentando la repetibilidad del proceso. Esto resulta especialmente valioso en entornos industriales donde la producción requiere tolerancias ajustadas y un control exacto de los parámetros de mecanizado.

2.2.6.3. Integración CAD/CAM en la Manufactura CNC

La verdadera eficiencia de estas herramientas se alcanza al integrarlas en un entorno CAD/CAM unificado, donde la información fluye de manera continua desde el diseño hasta la manufactura. Esta integración elimina la duplicidad de tareas, reduce los errores de transferencia de datos y acelera el ciclo de desarrollo del producto. En un sistema CNC, esta sinergia se traduce en piezas con un nivel de precisión micrométrica, una reducción significativa de los tiempos de producción y una optimización en el uso de materiales.

Además, la vinculación CAD/CAM-CNC constituye un paso esencial hacia la **Industria 4.0**, donde los procesos de diseño, simulación y fabricación se conectan digitalmente mediante redes inteligentes y sistemas automatizados. De esta forma, el operario pasa de ser un ejecutor manual a un gestor de procesos tecnológicos, capaz de supervisar, programar y optimizar la producción con base en datos precisos y en tiempo real.

2.2.7. Movimientos y Control de Ejes en un Torno CNC

En cuanto a los movimientos de un torno CNC (Control Numérico Computarizado), estos se desarrollan principalmente en los ejes **X** y **Z**, los cuales determinan la trayectoria de la herramienta con respecto a la pieza de trabajo. El eje **Z** controla el desplazamiento longitudinal de la herramienta a lo largo del eje principal de la pieza, mientras que el eje **X** regula el movimiento transversal, definiendo así el diámetro final del mecanizado. A estos desplazamientos lineales se suma el movimiento de rotación del husillo, encargado de hacer girar la pieza de forma controlada, lo que permite ejecutar operaciones fundamentales como cilindrado, refrentado, ranurado o roscado. Dominar estos movimientos resulta esencial para obtener acabados superficiales de alta calidad y optimizar los tiempos de producción tanto en entornos industriales como académicos.

El control preciso de los ejes en un torno CNC se realiza mediante instrucciones codificadas en lenguaje **G** (*G-code*), las cuales definen los desplazamientos, velocidades, avances y trayectorias que debe seguir la herramienta de corte. Cada comando indica a la máquina las coordenadas exactas que debe alcanzar, permitiendo reproducir con alta fidelidad el diseño generado en el software CAD/CAM. Este sistema de control garantiza una repetibilidad milimétrica en los procesos de mecanizado, lo que se traduce en piezas estandarizadas y de excelente calidad dimensional. Asimismo, la sincronización entre el movimiento rotacional del husillo y los desplazamientos de los ejes **X** y **Z** permite ejecutar operaciones complejas como roscados automáticos, torneado cónico o mecanizado de perfiles irregulares, tareas que en un torno convencional requerirían una elevada destreza manual.

Desde un enfoque académico e investigativo, la comprensión profunda de los movimientos de un torno CNC adquiere especial relevancia, ya que constituye la base para la optimización de parámetros de mecanizado como la *velocidad de corte*, el *avance por revolución* y la *profundidad de pasada*. Estos parámetros influyen directamente en la productividad, el acabado superficial y la vida útil de las herramientas. En el ámbito de la formación técnica y universitaria, el estudio de los ejes **X** y **Z** no solo permite comprender la cinemática del proceso, sino también aplicar conceptos de control, automatización y simulación propios de la manufactura inteligente e **Industria 4.0**. De esta forma, el dominio de los movimientos del torno CNC no se limita al ámbito operativo, sino que se convierte en una competencia clave para el diseño de procesos de manufactura avanzada, contribuyendo al desarrollo de soluciones tecnológicas más precisas, eficientes y sostenibles.

2.2.8. Virtualización y Programación CAM

El **modelado tridimensional** y la **programación asistida por computadora (CAM)** constituyen pilares fundamentales en la manufactura digital. Software como *Autodesk Fusion 360* y *SprutCAM* permiten crear representaciones virtuales de las máquinas-herramienta, simular trayectorias CNC y optimizar parámetros antes de la ejecución física.

Esta práctica no solo reduce costos de prueba y error, sino que también garantiza un mayor grado de seguridad en entornos académicos, al permitir validar códigos de mecanizado en simulaciones antes de implementarlos en la máquina real.

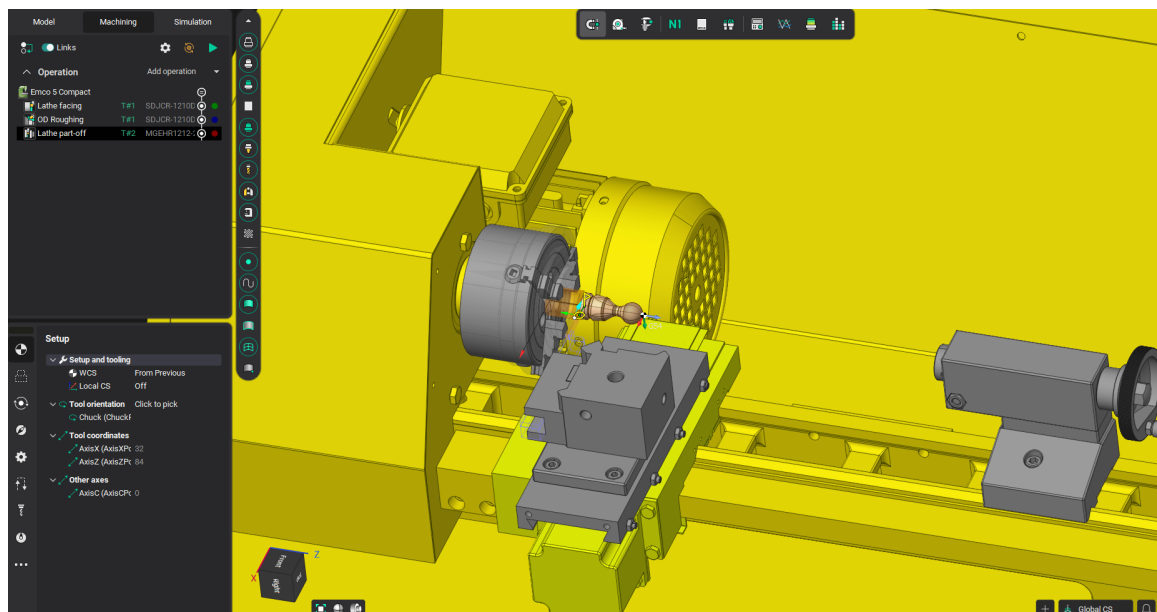


Figura 2.2.2: Maqueta virtual de torno EMCO Compact 5. Elaboración propia.

2.2.9. Automatización de Máquinas-Herramienta

La automatización aplicada a máquinas convencionales, como tornos o fresadoras, busca optimizar su desempeño mediante la incorporación de sistemas de control electrónico y motores de precisión. Entre los componentes más relevantes se encuentran los **microcontroladores**, los **drivers de potencia**, el **software de control CNC** y los **sistemas multitarjeta**.

2.2.9.1. Microcontroladores

Los microcontroladores constituyen el núcleo operativo de numerosos sistemas embebidos modernos, desempeñando funciones críticas en el control de procesos en tiempo real. Estos dispositivos integran en un solo chip una unidad central de procesamiento (CPU), memoria

y periféricos de entrada y salida, lo que permite ejecutar instrucciones lógicas y aritméticas con gran eficiencia y un consumo energético reducido. Su arquitectura optimizada para tareas de control determinista los convierte en una solución ideal para aplicaciones industriales, robóticas y de automatización, donde se requiere precisión temporal, estabilidad y respuesta inmediata ante eventos externos.

En el contexto de la automatización industrial y del control numérico computarizado (CNC), los microcontroladores han permitido el desarrollo de tarjetas controladoras especializadas, capaces de gestionar múltiples ejes de movimiento con elevada sincronización y exactitud. Un ejemplo representativo de este tipo de dispositivos son las **tarjetas Mach3 de 4 ejes**, las cuales actúan como una interfaz entre el software de control y los actuadores del sistema mecánico. Estas tarjetas están diseñadas para recibir las señales de comando generadas por el programa Mach3, interpretarlas y distribuirlas a los controladores de motor paso a paso o servomotores que gobiernan los ejes X, Y, Z y un eje adicional (A o rotacional).

El funcionamiento de las tarjetas Mach3 se basa en la generación precisa de trenes de pulsos Step/Dir (paso/dirección), que determinan tanto el desplazamiento como el sentido de rotación de los motores. Gracias a su microcontrolador interno y su circuito de aislamiento por optoacopladores, la tarjeta asegura una comunicación estable y protegida entre el computador y los actuadores, minimizando interferencias electromagnéticas y evitando pérdidas de señal. Este tipo de tarjetas suele operar bajo el protocolo de comunicación paralelo o, en versiones más recientes, mediante interfaces USB o Ethernet, ofreciendo una respuesta rápida y confiable. Su capacidad para manejar hasta cuatro ejes de forma simultánea la convierte en una herramienta esencial en la modernización de tornos, fresadoras y máquinas CNC de propósito didáctico o industrial.

Por otro lado, el **ESP32** representa una generación más avanzada de microcontroladores de propósito general, ampliamente utilizada en proyectos de automatización, sensado y control remoto. Desarrollado por Espressif Systems, este dispositivo incorpora un procesador de doble núcleo Tensilica Xtensa LX6 con frecuencia de hasta 240 MHz, junto con conectividad inalámbrica Wi-Fi y Bluetooth integrada, lo que le permite funcionar tanto como unidad de control local como nodo de comunicación dentro de redes IoT (Internet of Things). Esta capacidad de interconexión facilita la supervisión y el control remoto de sistemas mecatrónicos y CNC, posibilitando la transmisión de datos en tiempo real sobre parámetros de operación, estado de motores y diagnósticos del sistema.

El ESP32, además, ofrece un conjunto robusto de periféricos, entre los que destacan los temporizadores de alta resolución, los convertidores analógico-digital (ADC), los generadores PWM (Pulse Width Modulation) y las interfaces UART, SPI e I²C, que lo dotan de gran versatilidad para integrarse con sensores, controladores de motor, pantallas y módulos de expansión. Su programación mediante plataformas abiertas y entornos de desarrollo accesibles, como el ESP-IDF o PlatformIO, permite implementar rutinas de control en tiempo real con alta precisión y estabilidad, adaptadas a las necesidades específicas de cada aplicación.

En comparación con las tarjetas Mach3, el ESP32 ofrece una solución más flexible y de bajo costo para el desarrollo de sistemas CNC o de automatización distribuida, ya que puede actuar tanto como unidad de control central como nodo auxiliar encargado de tareas específicas, tales como el monitoreo de temperatura, la lectura de sensores de posición o la comunicación inalámbrica entre módulos. Sin embargo, las tarjetas Mach3 mantienen la ventaja en entornos industriales donde se requiere compatibilidad directa con software de control profesional y una estructura de control de movimiento estrictamente sincronizada.

Tanto las tarjetas Mach3 de 4 ejes como el microcontrolador ESP32 representan dos enfoques complementarios dentro del campo de los sistemas embebidos aplicados al control de máquinas CNC. Mientras las primeras se orientan hacia la interfaz directa y robusta con el hardware de potencia y el control de movimiento multieje, el ESP32 destaca por su capacidad de procesamiento, conectividad y flexibilidad programable, atributos que lo convierten en un componente estratégico para la integración de soluciones inteligentes e interconectadas en el ámbito de la manufactura moderna. Ambos dispositivos reflejan la evolución de los microcontroladores hacia sistemas cada vez más eficientes, versátiles y adaptados a las necesidades de la **Industria 4.0**.

2.2.9.2. Drivers de Potencia

Los drivers de potencia constituyen un elemento fundamental dentro de los sistemas de automatización y control de movimiento, especialmente en aplicaciones de maquinaria CNC, robótica y mecatrónica. Su función principal es actuar como interfaz entre el microcontrolador o la tarjeta de control y los actuadores electromecánicos, tales como motores paso a paso o servomotores. Estos dispositivos permiten amplificar las señales de control de baja potencia, generadas por la unidad lógica, hasta niveles de corriente y tensión adecuados para accionar los motores con precisión, eficiencia y estabilidad.

En esencia, un driver de potencia traduce las órdenes digitales provenientes del sistema de control, generalmente señales de tipo Step/Dir (paso y dirección) o PWM (modulación por ancho de pulso) en impulsos eléctricos capaces de inducir el movimiento del motor. Para ello, integran etapas de conmutación y protección que garantizan una correcta gestión de la energía, evitando sobrecorrientes, sobrecalentamientos o daños a los componentes electrónicos. Los circuitos más comunes emplean transistores MOSFET o IGBT como elementos de potencia, debido a su alta eficiencia de conmutación, bajo tiempo de respuesta y capacidad de manejar cargas inductivas con mínimas pérdidas térmicas.

En el caso de los motores paso a paso, los drivers se encargan de secuenciar los pulsos de corriente a las bobinas del estator, controlando de esta manera el ángulo de giro y la velocidad del rotor. Los drivers modernos, como los modelos TB6600, DM542 o A4988, incluyen sistemas de microstepping, que permiten subdividir cada paso completo del motor en fracciones menores, aumentando la resolución de posicionamiento y reduciendo la vibración mecánica. Este control preciso resulta esencial en máquinas CNC de pequeño y mediano formato, donde la calidad del acabado superficial y la exactitud dimensional dependen directamente de la suavidad del movimiento de los ejes.

En el caso de los servomotores, los drivers de potencia desempeñan un papel aún más complejo, ya que no sólo amplifican la señal de control, sino que también gestionan el bucle de retroalimentación (feedback) proveniente de sensores de posición, velocidad o par, como encoders ópticos o resolvers. Esta retroalimentación permite ajustar de manera continua la salida del driver, garantizando un movimiento estable y compensando perturbaciones externas o variaciones de carga. Los drivers para servomotores, como los modelos Yaskawa Sigma o Leadshine ACS, integran algoritmos de control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) o vectorial de campo (FOC), que optimizan el desempeño dinámico y la eficiencia energética del sistema.

Un aspecto crítico en el diseño y selección de drivers de potencia es su compatibilidad eléctrica y lógica con el microcontrolador o la tarjeta de control, así como con las características del motor. Factores como la tensión de alimentación, la corriente máxima por fase, la frecuencia de conmutación y los modos de control deben ser cuidadosamente evaluados para evitar fallos operativos o pérdida de sincronización. Además, los drivers modernos incluyen mecanismos de protección térmica y de sobrecorriente, indicadores LED de diagnóstico y, en algunos casos, comunicación digital mediante UART, RS-485 o CAN bus, lo que facilita su integración en sistemas distribuidos o supervisados remotamente.

En conjunto, los drivers de potencia representan el vínculo energético y funcional entre la electrónica de control y el sistema mecánico, determinando en gran medida la precisión, eficiencia y fiabilidad del movimiento en los procesos automatizados. Su evolución tecnológica ha permitido desarrollar controladores más compactos, silenciosos y eficientes, alineados con los requerimientos de la **Industria 4.0**.

2.2.9.3. Software de Control CNC

El **software de control CNC** (Control Numérico Computarizado) constituye el componente lógico encargado de coordinar la comunicación entre el usuario y la máquina herramienta, convirtiéndose en el cerebro operativo de los sistemas de manufactura automatizada. Su función principal es interpretar los códigos G y M provenientes del diseño asistido por computadora (CAD) o la programación manual, y transformarlos en señales de movimiento y control que gobiernan los ejes y periféricos del sistema. De esta forma, el software de control actúa como intermediario entre la programación del proceso de mecanizado y la ejecución física de las trayectorias, garantizando precisión, repetibilidad y estabilidad durante la operación.

Entre los sistemas más representativos se destacan **Mach3**, **LinuxCNC** y **GRBL**, cada uno con características particulares que los hacen adecuados para distintos entornos de aplicación.

El software Mach3, desarrollado por ArtSoft ([Newfangled Solutions, 2025](#)), es una de las plataformas más utilizadas en el ámbito semiprofesional e industrial para el control de máquinas CNC de tres o más ejes. Este programa convierte un computador convencional en un potente controlador de movimiento, capaz de generar trenes de pulsos Step/Dir a través de interfaces paralelas o USB. Mach3 ofrece un entorno gráfico intuitivo que facilita la configuración de parámetros como velocidad de avance, aceleración, límites de recorrido, compensación de herramientas y control de ejes coordinados. Además, permite integrar macros personalizadas, controlar dispositivos periféricos (refrigeración, husillo, sensores de referencia) y ejecutar secuencias automáticas de mecanizado, lo que lo convierte en una herramienta flexible y ampliamente adoptada en laboratorios y talleres.

Por su parte, **LinuxCNC** (anteriormente conocido como EMC2) [LinuxCNC Project \(2025\)](#) es un sistema de control de código abierto basado en el sistema operativo Linux, diseñado para proporcionar control en tiempo real sobre máquinas CNC, robots y manipuladores industriales. Una de sus principales ventajas es su arquitectura modular, que permite adaptar la interfaz de usuario, los algoritmos de control y los módulos de comunicación a diferentes tipos de hardware.

Gracias a su naturaleza open-source, LinuxCNC ofrece una plataforma altamente personalizable, utilizada tanto en investigación académica como en aplicaciones industriales donde se requiere una integración profunda con hardware especializado. Su núcleo de tiempo real garantiza una sincronización precisa de los movimientos, reduciendo errores de interpolación y manteniendo una elevada estabilidad en procesos de mecanizado complejo.

En un enfoque más ligero, el firmware **GRBL** ([OpenBuilds Team, 2025](#))openbuilds2025 representa una solución optimizada para sistemas CNC de bajo costo y arquitectura compacta. Desarrollado originalmente para microcontroladores AVR y posteriormente adaptado a plataformas más potentes como el ESP32, GRBL ejecuta la interpretación de códigos G directamente en el microcontrolador, generando las señales de control necesarias para los drivers de los motores. Este firmware es ampliamente utilizado en máquinas de escritorio, grabadoras láser, routers CNC y plotters, debido a su bajo consumo de recursos, alta precisión y facilidad de implementación. A diferencia de Mach3 o LinuxCNC, GRBL no requiere un computador dedicado, sino que funciona como un firmware embebido en la propia tarjeta controladora, lo que lo hace ideal para entornos educativos y de prototipado.

La integración correcta de estos programas dentro del ecosistema CNC junto con las tarjetas de control, los drivers de potencia y los microcontroladores es esencial para alcanzar resultados precisos, repetibles y estables en los procesos de mecanizado. El software de control no solo determina la exactitud geométrica de la pieza, sino que también influye en la eficiencia del sistema, la calidad superficial y la seguridad operativa. En consecuencia, su selección y configuración adecuada constituyen un factor determinante para el desempeño global de cualquier máquina CNC, tanto en contextos industriales como académicos.

2.2.9.4. Sistemas Multitarjeta en Automatización

El concepto de **sistema multitarjeta** hace referencia a la distribución de tareas de control en múltiples microcontroladores que se comunican entre sí mediante protocolos seriales o buses de comunicación. Esta arquitectura distribuida es empleada en la industria para garantizar escalabilidad, modularidad y robustez en sistemas complejos ([Kuo, 1997](#)).

En un contexto educativo, el uso de sistemas multitarjeta permite desarrollar entornos de aprendizaje donde los estudiantes comprenden desde la electrónica de control hasta la programación de protocolos de comunicación, reforzando competencias integrales en ingeniería.

Capítulo 3

Metodología

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo de carácter aplicado, dado que busca diseñar e implementar un sistema de control multitarjeta para un torno CNC biaxial de bajo costo, orientado a la formación académica en zonas rurales. De acuerdo con ([Hernández-Sampieri et al., 2014](#)), este tipo de investigación permite medir, analizar y validar fenómenos tecnológicos mediante la recopilación de datos objetivos y la experimentación.

El estudio se organiza en cuatro fases metodológicas, cada una alineada con los objetivos específicos del proyecto:

Fase de diagnóstico e inspección del equipo: identificación del estado inicial del torno biaxial, levantamiento de información técnica y definición de requerimientos del sistema de control.

Fase de diseño del sistema de control multitarjeta: modelado conceptual y esquemático del sistema, selección de hardware y software, y definición de la arquitectura de control.

Fase de integración e implementación: ensamblaje del sistema de control, desarrollo de la programación de las tarjetas, y conexión con el torno para pruebas preliminares.

Fase de validación experimental: ejecución de pruebas de funcionamiento, comparación de desempeño con parámetros de referencia (precisión, repetibilidad, tiempo de respuesta) y análisis de resultados frente a los objetivos planteados.

Esta secuencia metodológica permite garantizar que el prototipo cumpla con criterios de factibilidad técnica, aplicabilidad académica y pertinencia en contextos rurales.

3.1. Fase 1: Revisión e inspección de la máquina y selección de componentes

Cuadro 3.1.1: Fase 1. Revisión e inspección de la máquina y selección de componentes

Actividad	Técnica	Instrumento	Evidencia generada	Resultado esperado
Revisión técnica del torno	Inspección visual y levantamiento técnico	Cámara fotográfica, fichas de registro, calibrador	Fotografías del estado inicial, fichas técnicas de componentes mecánicos	Diagnóstico del estado mecánico del torno convencional
Documentación del estado de componentes	Análisis comparativo (antes y después)	Notas de campo, formatos de inspección	Informe fotográfico comparativo de componentes mecánicos	Identificación de elementos a mejorar y registro de mejoras implementadas
Selección de componentes tecnológicos	Análisis multicriterio (costo, precisión, compatibilidad)	Tablas comparativas, cotizaciones, fichas técnicas	Tabla de criterios de selección y presupuesto estimado	Definición de requerimientos técnicos mínimos y estimación de costos asociados

3.1.1. Revisión técnica del torno

La revisión técnica del torno consistió en una inspección exhaustiva del estado funcional del equipo para asegurar su rendimiento operativo, la integridad mecánica de sus sistemas y la precisión en las operaciones de mecanizado. Este proceso incluye la evaluación detallada de componentes mecánicos críticos, identificando posibles desgastes, holguras o desajustes que puedan comprometer la estabilidad del proceso.

Asimismo, se verifican los sistemas de lubricación, transmisión, guías y husillos, confirmando su conformidad con las especificaciones del fabricante. Esta revisión permite anticipar fallas,

optimizar estrategias de mantenimiento y extender la vida útil del torno, garantizando la continuidad y calidad de los procesos de manufactura dentro del marco investigativo.

3.1.2. Desarme de los Componentes Críticos del Equipo

Se realiza el desmontaje controlado de los elementos estructurales y de transmisión para permitir la inspección directa de superficies de contacto, mecanismos internos y puntos de desgaste.

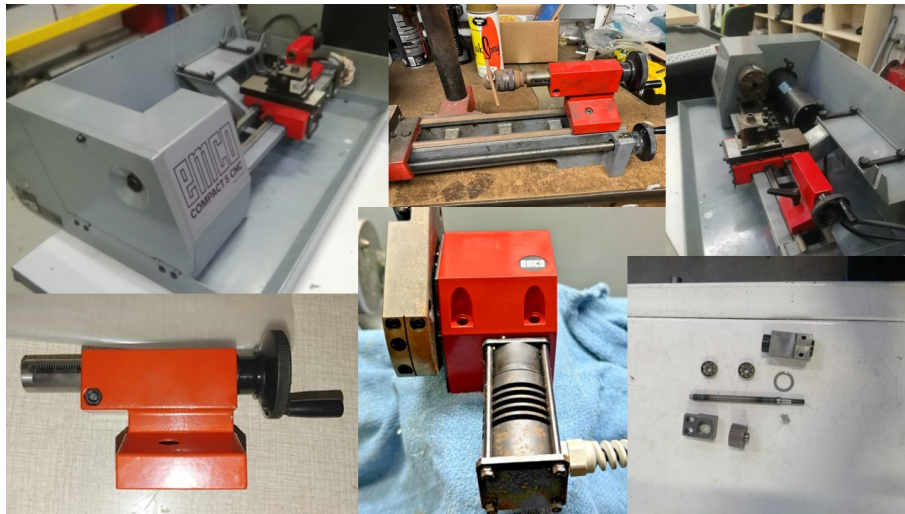


Figura 3.1.1: Esquema general del desarme de los componentes críticos del torno.

Como se observa en la Fig. 3.1.1, el proceso de desarme permite acceder a los elementos internos para su inspección detallada.

3.1.3. Revisión de Tuercas y Tornillos de Bolas Recirculantes del Carro Longitudinal y transversal

La Fig. 3.1.2 presenta los ensamblajes de transmisión mediante tornillo de bolas utilizados en ambos carros, permitiendo comparar su configuración mecánica, estado superficial y posibles holguras.

3.1.4. Revisión del Motor del Husillo Principal

Se analiza el desempeño del motor del husillo, incluyendo ruidos anómalos, temperatura de operación, vibraciones y estado general de los rodamientos y acoplamientos.

La Fig. 3.1.3 muestra el motor del husillo principal, donde se verifican vibraciones, ruidos anómalos, temperatura de operación, alineación y estado de rodamientos y acoplamientos.



(a) Carro longitudinal



(b) Carro transversal

Figura 3.1.2: Conjunto de tuercas y tornillos de bolas recirculantes correspondientes a los carros longitudinal y transversal.

3.1.5. Revisión de Poleas de los Carros Transversal y Longitudinal

Se revisan las poleas asociadas a los sistemas de desplazamiento, verificando desgaste, tensión de correas y alineación para garantizar la transmisión eficiente de movimiento.

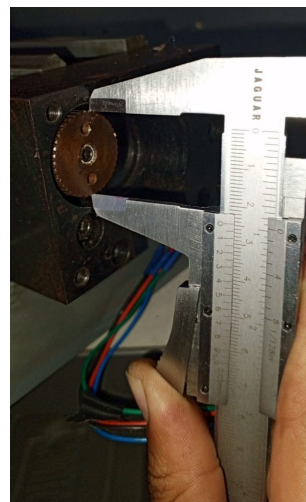


Figura 3.1.4: Inspección de las poleas asociadas a los sistemas de movimiento de los carros transversal y longitudinal.



Figura 3.1.3: Vista del motor del husillo principal durante el proceso de inspección.

La Fig. 3.1.4 muestra el estado de las poleas en ambos carros, permitiendo evaluar desgaste, alineación, tensión de correas y condiciones generales de transmisión.

3.1.6. Plan de Mantenimiento del Torno EMCO COMPACT 5

Plan de mantenimiento				
Tipo	Actividad	Frecuencia	Responsable	Notas
Predictivo	Análisis de vibraciones en husillo y motores	Mensual	Técnico vibro	Guardar espectros
Predictivo	Termografía gabinete y drivers	Trimestral	Ing. eléctrico	Registro FLIR
Preventivo	Lubricar guías y husillos	Cada 100 h	Operario	Aceite ISO VG 68
Preventivo	Cambio filtros refrigerante	Mensual	Operario	Limpeza tanque
Programado	Alineación y colinealidad husillo-contrapunto	Semestral	Ing. mecánico	Con barra patrón
Programado	Calibración ejes con ballbar/laser	Semestral	Servicio	Guardar reporte
Correctivo	Cambio de rodamientos husillo	Según condición	Servicio	Kit original

Figura 3.1.5: Diagrama general del plan de mantenimiento preventivo para el torno EMCO Compact 5.

La Fig. 3.1.5 presenta la estructura del plan de mantenimiento preventivo, incluyendo la periodicidad de inspecciones, actividades críticas y componentes clave del equipo.

3.1.7. Documentación del estado de componentes

Cuadro 3.1.2: BoM – Sistema Bancada

Ítem	Componente	Cant.	Material / Tipo	Estado
1	Base / Bed	1	Fundición GG25	En buen estado
2	Guías prismáticas Z	1	Acero rectificado	En buen estado
3	Guías X	2	Acero rectificado	En buen estado
4	Pies de nivelación	4	Acero	En buen estado
5	Bandeja de virutas	1	Chapa metálica	En buen estado

Cuadro 3.1.3: BoM – Cabezal y Husillo

Ítem	Componente	Cant.	Material / Tipo	Estado
6	Cuerpo de cabezal	1	Fundición	En buen estado
7	Husillo principal	1	Acero aleado	En buen estado
8	Rodamientos angulares	2	P5/P4	Para cambio
9	Rodamiento trasero	1	Cilíndrico	Para cambio
10	Polea impulsada	1	Aluminio/acero	Para cambio

Cuadro 3.1.4: BoM – Sistema de Transmisión

Ítem	Componente	Cant.	Material / Tipo	Estado
11	Polea motriz	1	Aluminio/acero	Para cambio
12	Correa dentada/V	1	Goma reforzada	Para cambio
13	Motor husillo	1	Motor AC/DC	En buen estado

Cuadro 3.1.5: BoM – Sistema de Sujeción (Plato)

Ítem	Componente	Cant.	Material / Tipo	Estado
14	Plato 3 garras	1	Acero	En buen estado
15	Garras internas	1	Acero	En buen estado
16	Garras externas	1	Acero	En buen estado
17	Llave de plato	1	Acero	En buen estado

Cuadro 3.1.6: BoM – Eje Z (Carro Longitudinal)

Ítem	Componente	Cant.	Material / Tipo	Estado
18	Carro longitudinal	1	Acero	En buen estado
19	Tornillo bolas Z	1	Ø12-16 mm	En buen estado
20	Tuerca bolas Z	1	Recirculante	En buen estado
21	Soporte delantero Z	1	Con rodamiento	En buen estado
22	Soporte trasero Z	1	Con rodamiento	En buen estado
23	Motor eje Z	1	Stepper/servo	Reemplazo requerido
24	Acople motor-tornillo Z	1	Flexible	En buen estado
25	Finales de carrera Z	2	Sensor	En buen estado

Cuadro 3.1.7: BoM – Eje X (Carro Transversal)

Ítem	Componente	Cant.	Material / Tipo	Estado
26	Carro transversal	1	Acero	En buen estado
27	Tornillo bolas X	1	Ø10–12 mm	En buen estado
28	Tuerca bolas X	1	Recirculante	En buen estado
29	Soportes tornillo X	2	Con rodamientos	En buen estado
30	Motor eje X	1	Stepper/servo	Reemplazo requerido
31	Acople motor–tornillo X	1	Flexible	En buen estado
32	Finales de carrera X	2	Sensor	En buen estado

Cuadro 3.1.8: BoM – Torreta Portaherramientas

Ítem	Componente	Cant.	Material / Tipo	Estado
33	Torreta indexable	1	4-6 posiciones	En buen estado
34	Motor/actuador torreta	1	Electromecánico	En buen estado
35	Sensores de posición	2	Inductivos	En buen estado

Cuadro 3.1.9: BoM – Contrapunto

Ítem	Componente	Cant.	Material / Tipo	Estado
36	Cuerpo contrapunto	1	Fundición	En buen estado
37	Caña (quill)	1	Acero	En buen estado
38	Punta giratoria	1	Morse	En buen estado

Cuadro 3.1.10: BoM – Sistema CNC

Ítem	Componente	Cant.	Material / Tipo	Estado
39	Controlador CNC	1	Control + HMI	Reemplazo requerido
40	Drivers X/Z/Spindle	3	Electrónica potencia	Reemplazo requerido
41	Fuente de poder	1	24/48 VDC	Se implementa
42	Gabinete eléctrico	1	Chapa + ventilación	Se implementa
43	Relés / contactores	1	Protecciones	Se implementa
44	Cableado	1	Cobre apantallado	Se implementa
45	Paro de emergencia	1	Botonera	Se implementa

Cuadro 3.1.11: BoM – Sistemas Auxiliares

Ítem	Componente	Cant.	Material / Tipo	Estado
46	Bomba refrigerante	1	0.1–0.2 kW	Trabajos futuros
47	Depósito refrigerante	1	Plástico/metal	Trabajos futuros
48	Sistema de lubricación	1	Centralizado	Trabajos futuros
49	Iluminación LED	1	12/24 V	Trabajos futuros
50	Carenado / Enclosure	1	Policarbonato + metal	Se implementa

3.1.8. Selección de componentes tecnológicos

3.1.8.1. Motor Paso a Paso NEMA 23 (1.8 N·m)

Descripción: Motor paso a paso con brida estándar NEMA 23 y par nominal de 1.8 N·m (aprox. 254 oz·in). Opera típicamente a 200 pasos por revolución (1.8°/paso) y es compatible con controladores de tipo step/dir.

Justificación técnica:

- **Par y dinámica:** El par de 1.8 N·m proporciona un equilibrio adecuado entre potencia y tamaño para tornos de banco reconvertidos. Permite compensar pérdidas por fricción, el avance por tornillo y fuerzas de corte propias de operaciones de desbaste ligero a medio, especialmente cuando se combina con aceleraciones adecuadas y relaciones mecánicas apropiadas.
- **Precisión incremental:** La resolución base de 200 pasos/rev, multiplicada por microstepping (8x–16x), brinda resolución suficiente para posicionamientos finos en

torneado, alcanzando centésimas o décimas de milímetro según la transmisión utilizada.

- **Disponibilidad y costo:** NEMA 23 es un estándar ampliamente documentado, con repuestos económicos y curvas de corriente/tensión bien caracterizadas.
- **Simplicidad educativa:** Su principio de operación permite explicar conceptos como paso, microstepping y respuesta del motor frente a carga y aceleración.

Consideraciones prácticas:

- Seleccionar un driver cuya corriente máxima coincida o supere la corriente nominal del motor.
- Considerar la caída de par con la velocidad (curva torque-rpm) para evitar pérdida de pasos.
- Evaluar la necesidad de reductores o acoplamientos en función del avance por tornillo para garantizar el par y la resolución final requerida.



Figura 3.1.6: Motor paso a paso NEMA 23 utilizado para el accionamiento de los ejes del torno.

La Fig. 3.1.6 muestra el motor NEMA 23 empleado en el sistema, permitiendo identificar su configuración mecánica, dimensiones estándar y características de montaje.

3.1.8.2. Tarjeta de Control Mach3 (4 Ejes) – Aplicación en Ejes X y Z

Descripción: Tarjeta de interfaz compatible con Mach3, encargada de recibir señales del software de control y generar señales step/dir y E/S para drivers y periféricos. Aunque la tarjeta

dispone de cuatro ejes, en este proyecto se emplean únicamente X y Z, dejando capacidad de expansión futura.

Justificación técnica:

- **Integración con Mach3:** Mach3 es ampliamente utilizado en entornos educativos e industriales. La tarjeta elimina la dependencia de puertos paralelos, generando señales eléctricas estables para los drivers.
- **Escalabilidad:** Al disponer de cuatro ejes, se facilita la incorporación futura de un eje adicional (Y, eje rotativo, alimentador de herramienta, etc.).
- **E/S y protecciones:** Incluye entradas para finales de carrera, alarmas, salidas para relés (encendido del spindle), señales PWM y entradas para sensores, reduciendo cableado y aumentando la seguridad.
- **Repetibilidad:** Proporciona señales con bajo jitter, garantizando movimientos suaves y repetibles.

Consideraciones prácticas:

- Verificar el nivel lógico de salida (TTL 5 V o 3.3 V) para compatibilidad con los drivers.
- Usar cableado apantallado para señales step/dir, separando potencia y señales para reducir ruido.
- Configurar correctamente los pasos/mm en Mach3 según la mecánica del torno.

Control de 4 ejes: X, Y, Z y A (eje rotatorio)

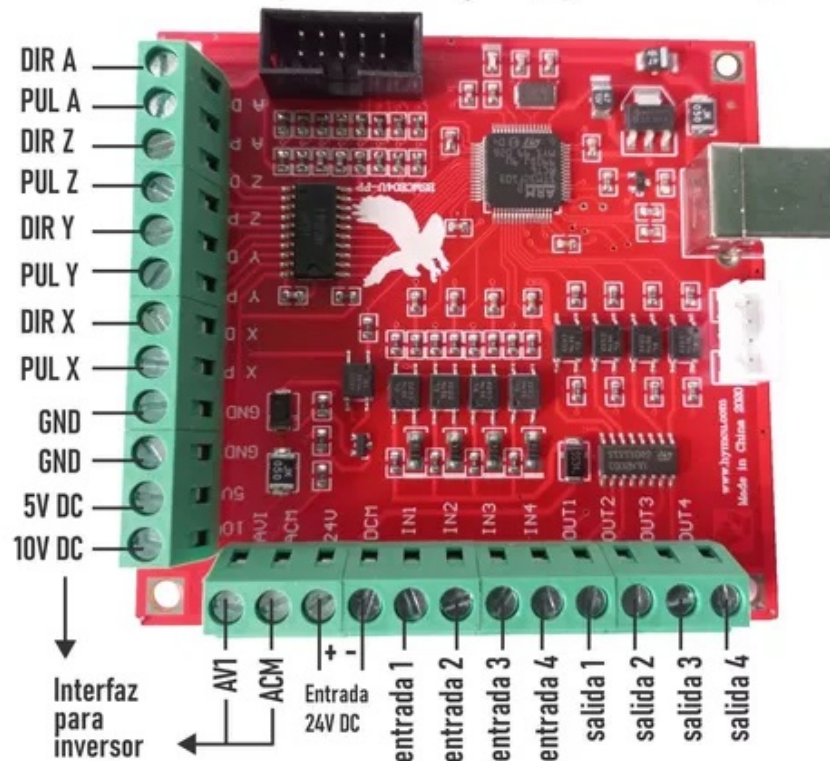


Figura 3.1.7: Diagrama del sistema de control Mach3 en su configuración de tarjeta roja, mostrando la distribución de señales, entradas, salidas y puertos de control.

La Fig. 3.1.7 presenta la arquitectura del controlador Mach3 tipo “tarjeta roja”, permitiendo identificar la asignación de pines, la lógica de conexión con los drivers y la estructura del sistema de control CNC.

3.1.8.3. Drivers de Potencia para Motores Paso a Paso

Descripción: Conjunto de drivers (por ejemplo, DM542, TB6600 o equivalentes) encargados de gestionar corriente, microstepping y protección de los motores NEMA 23, interpretando señales step/dir provenientes de la tarjeta Mach3.

Justificación técnica:

- **Control preciso de corriente y microstepping:** Permiten ajustar parámetros eléctricos para obtener rendimiento óptimo sin riesgo de sobrecalentamiento.
- **Protección del sistema:** Incluyen protección contra sobrecorriente, apagado térmico y detección de fallas, mejorando la fiabilidad general.

- **Amplio rango de alimentación:** Drivers con rangos de 24–48 VDC mejoran la respuesta dinámica del motor al minimizar la caída de par a altas velocidades.

Consideraciones prácticas:

- Dimensionar adecuadamente la fuente de alimentación considerando corrientes pico.
- Garantizar ventilación o disipación térmica para drivers y motores.
- Mantener circuitos claramente aislados y etiquetados para facilitar mantenimiento.

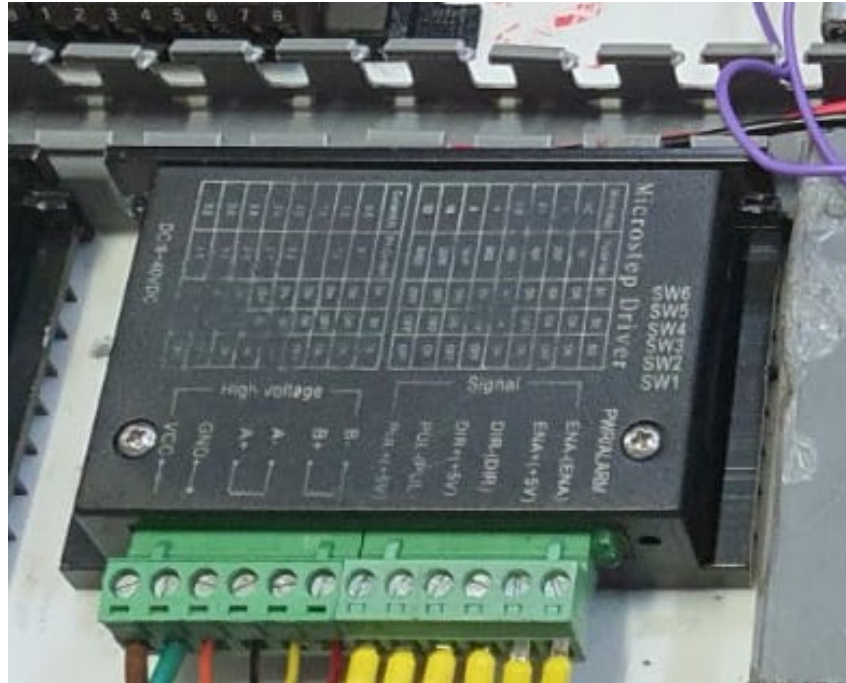


Figura 3.1.8: Driver TB6600 utilizado para el control de motores paso a paso en sistemas CNC.

La Fig. 3.1.8 muestra el controlador TB6600, empleado comúnmente para accionar motores paso a paso NEMA bajo diferentes configuraciones de corriente y micropasos.

3.1.8.4. Placa ESP32 como Sistema Embebido Auxiliar

Descripción: Microcontrolador ESP32 con conectividad Wi-Fi/Bluetooth, múltiples GPIO, PWM y ADC. Se integrará como módulo auxiliar en el sistema CNC, complementando la electrónica principal basada en Mach3.

Roles propuestos dentro de la arquitectura:

- Lectura de sensores y finales de carrera, gestión de botones y supervisión del sistema.
- Interfaz HMI remota mediante servidor web o conexión por telnet/HTTP.

- Supervisión de seguridad (E-Stop) y bloqueo local ante fallos del PC.
- Alternativa open-source para control autónomo mediante GRBL-ESP32 (opcional).

Justificación académica y práctica:

- **Valor formativo:** La ESP32 permite trabajar con firmware, protocolos de comunicación y arquitectura embebida open-source.
- **Costo y versatilidad:** Es una solución económica que amplía capacidades del sistema (telemetría, conectividad, registro de datos).
- **Seguridad y redundancia:** Aporta una capa adicional de protección independiente del PC.

Consideraciones prácticas:

- Garantizar separación galvánica si se manejan cargas de potencia (uso de optoacopladores).
- Implementar watchdogs y rutinas de seguridad.
- Documentar firmware, APIs y librerías utilizadas (GRBL-ESP32, FreeRTOS o desarrollo propio).

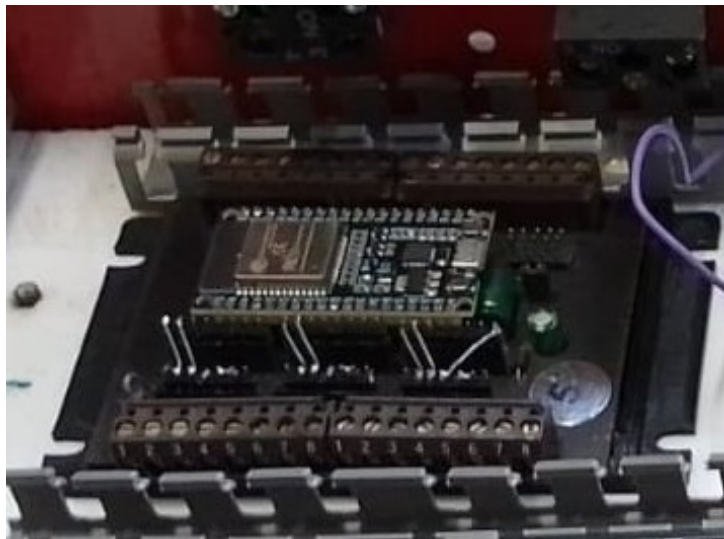


Figura 3.1.9: Módulo ESP32 utilizado para la adquisición de datos y comunicación inalámbrica en el sistema.

La Fig. 3.1.9 muestra el microcontrolador ESP32, destacando su capacidad de procesamiento y sus interfaces de comunicación para aplicaciones de control e IoT.

3.2. Fase 2: Diseño e integración del sistema

Con los componentes previamente seleccionados, en esta fase se lleva a cabo el diseño del sistema de control multitarjeta, asegurando su compatibilidad con la estructura mecánica del torno. El proceso contempla aspectos eléctricos y electrónicos fundamentales, como la integración de circuitos de potencia, relevos electromagnéticos, microcontroladores, drivers y motores paso a paso tipo NEMA, así como la configuración de tarjetas de control como Mach3 y ESP32.

El sistema se estructurará bajo un diseño modular y escalable, con una arquitectura distribuida que facilite la comunicación entre microcontroladores y permita la sincronización eficiente de las funciones de control. Para ello, se emplearán protocolos de comunicación confiables (p. ej., buses seriales) que garanticen la transferencia de datos en tiempo real y minimicen errores que puedan comprometer la precisión del mecanizado.

Esta comunicación será decisiva para la coordinación del movimiento de los motores paso a paso, el accionamiento de relevos y la ejecución de rutinas de control definidas en el software de gestión.

Cuadro 3.2.1: Fase 2. Diseño e integración del sistema multitarjeta

Actividad	Técnica	Instrumento	Evidencia generada	Resultado esperado
Diseño de la arquitectura de control	Modelado modular y esquemático	Diagramas eléctricos, software CAD eléctrico	Planos y diagramas de conexión del sistema	Definición clara de la arquitectura multitarjeta
Definición de protocolos de comunicación	Análisis técnico comparativo	Manuales de comunicación serial, software de simulación	Tabla comparativa de protocolos (UART, I2C, SPI)	Selección de protocolo confiable para comunicación en tiempo real
Selección de interfaz de usuario	Prototipado y análisis de usabilidad	Entorno de desarrollo gráfico, simuladores HMI	Bocetos y prototipo de interfaz	Diseño preliminar de la interfaz gráfica de supervisión y control
Creación del modelo 3D, cinemática y postprocesador CAM	Modelado 3D y simulación cinemática	Software CAD/CAM (Autodesk Inventor, Fusion 360, SolidWorks CAM)	Modelo tridimensional funcional, árbol cinemático y postprocesador configurado	Integración del modelo digital con la plataforma CAM para validación y simulación de movimientos CNC

3.2.1. Diseño de la Arquitectura de Control y la Interfaz de Usuario

3.2.1.1. Diseño de la Arquitectura de Control

Se diseñó y construyó un tablero de control que integra dos drivers dedicados a los motores paso a paso de los ejes X y Z. Estos drivers se enlazan a una tarjeta de interfaz que comunica el sistema con el computador mediante un puerto USB. A través de esta interfaz se envían las instrucciones generadas en Mach3, lo que permite ejecutar movimientos precisos de acuerdo con el programa

en operación. Además, se incorporó un selector que, mediante un sistema de relés, define desde qué módulo se dirigirán los pulsos hacia los drivers.

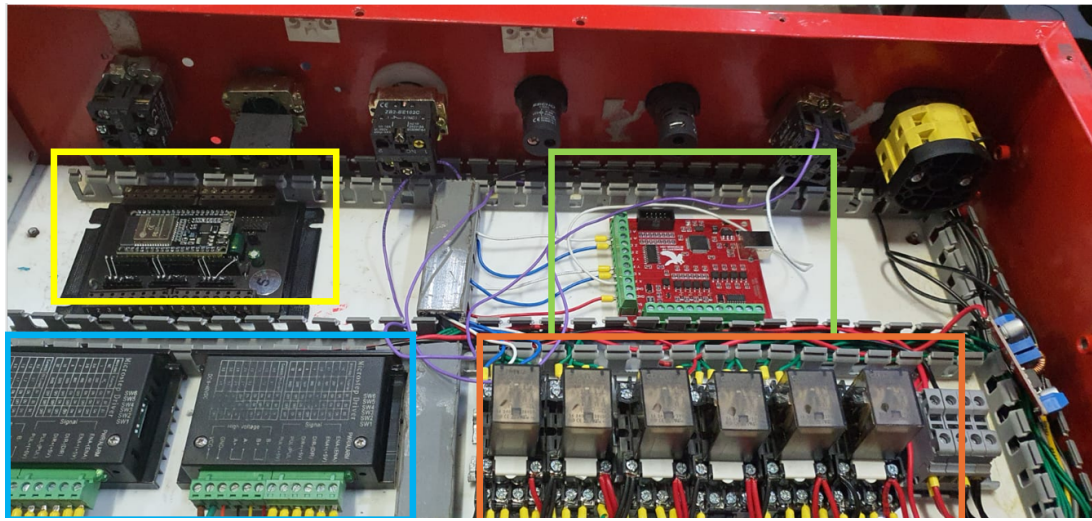


Figura 3.2.1: Panel de control CNC con identificación de módulos: SP32 (cuadro amarillo), Mach3 (cuadro verde), drivers de motores paso a paso (cuadro azul) y relés de potencia (cuadro naranja).

También se integró una tarjeta electrónica destinada al control manual de los motores. Esta tarjeta se comunica vía Bluetooth con una aplicación móvil desarrollada específicamente para el proyecto. La app permite realizar movimientos tipo jog en los ejes X y Z, y cuenta con un panel de texto para introducir comandos XZ que se envían directamente a los drivers desde el dispositivo móvil.

PLANO 1

DIAGRAMA TORNO CNC-EMCO

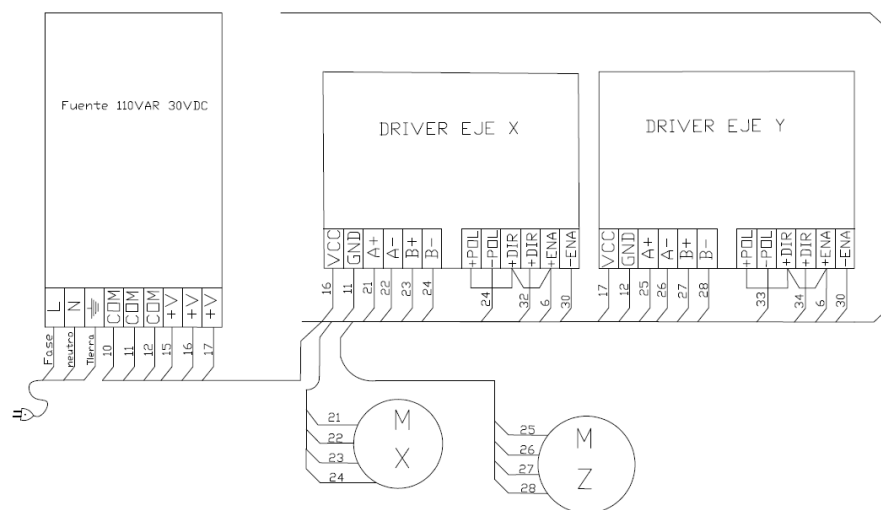


Figura 3.2.2: Plano 1. Diagrama eléctrico del torno CNC EMCO, mostrando la integración de la fuente de alimentación 110VAC-30VDC, drivers de los ejes X y Z, y conexión de motores paso a paso.

PLANO 2

DIAGRAMA TORNO CNC-EMCO

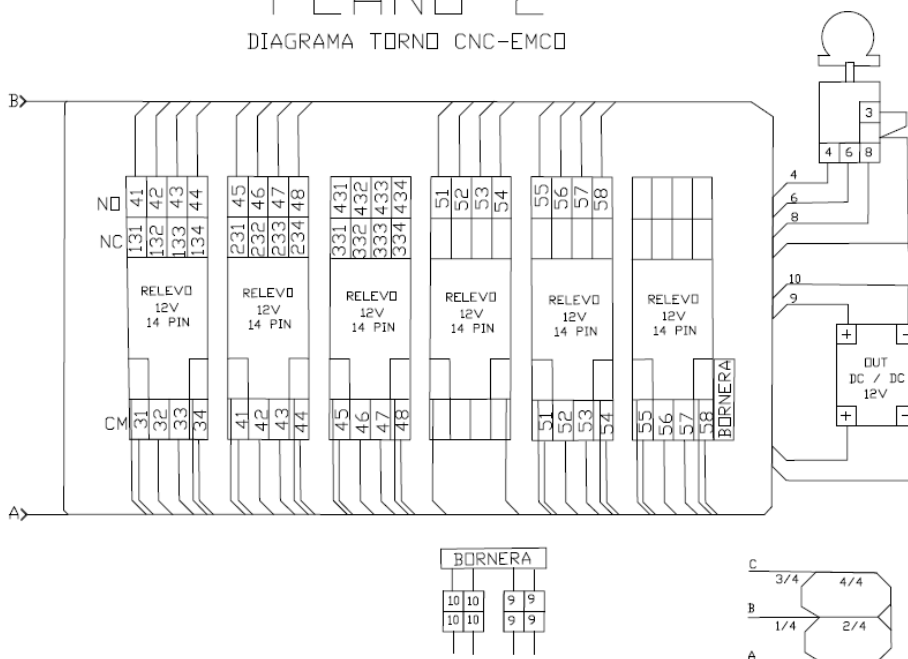


Figura 3.2.3: Plano 2. Diagrama de control del torno CNC EMCO, detallando la distribución y conexión del sistema de relés de 12V, la bornera de conexión y la interfaz de alimentación DC/DC.

El tablero incluye una matriz de relés a 12 V, gobernada por un selector que determina el origen de los pulsos enviados a los drivers. En la posición 0, los pulsos provienen del módulo controlado por Bluetooth; en la posición 1, son emitidos por la tarjeta conectada por USB al PC que ejecuta Mach3. Las posiciones adicionales están reservadas para futuras expansiones, que permitirán integrar nuevas tarjetas compatibles con otros entornos de software, como OpenBuilds [OpenBuilds Developers \(2025\)](#) u OpenCNC [OpenCNC Project \(2025\)](#).

PLANO 3

DIAGRAMA TORNO CNC-EMCO

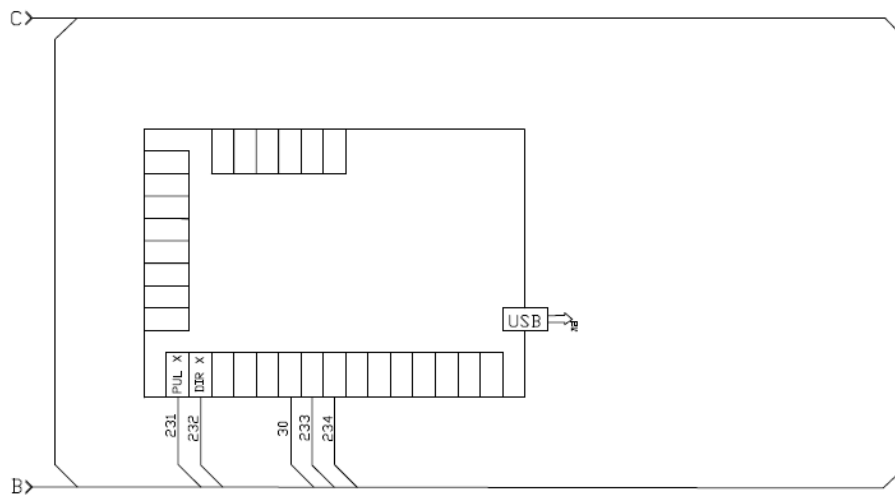


Figura 3.2.4: Plano 3. Diagrama de la tarjeta de control e interfaz USB del torno CNC EMCO, mostrando la disposición de pines de entrada/salida y su conexión con el sistema de control mach3.

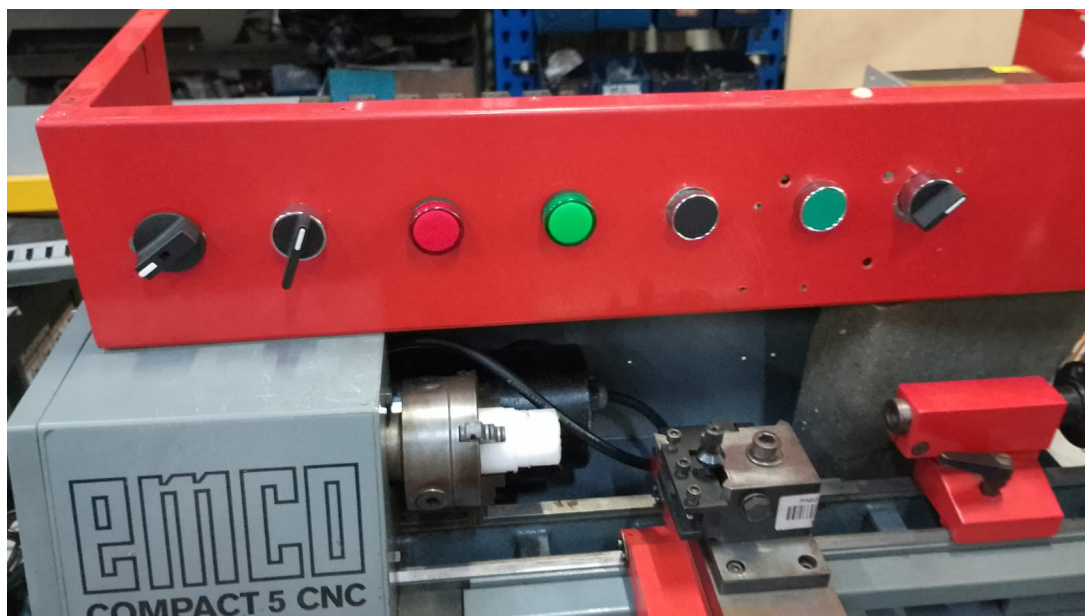


Figura 3.2.5: Panel frontal selector de tarjetas del torno EMCO CNC (Elaboración propia).

3.2.1.2. Diseño de la Interfaz de Usuario

Para materializar el diseño de la interfaz de usuario fue indispensable establecer una arquitectura de comunicación robusta entre el software de control Mach3 [Newfangled Solutions \(2025\)](#), LinuxCNC [LinuxCNC Project \(2025\)](#) o GRBL [grbl Development Team \(2025\)](#), según la plataforma seleccionada y el sistema multitarjeta encargado de gestionar los motores paso a paso, los sensores y los límites de carrera. Esto requirió configurar protocolos de intercambio de datos mediante puertos USB, LPT o interfaces seriales, garantizando que las señales de posición, velocidad y estado de los ejes fueran interpretadas con precisión por la interfaz gráfica.

Se desarrollaron rutinas de lectura en tiempo real para capturar la información proveniente de los encoders y los finales de carrera, lo que permitió representar en pantalla la posición instantánea de los ejes X y Z, junto con el estado operativo de los motores NEMA 23 seleccionados para la reconversión. Adicionalmente, se integraron indicadores visuales para alertas y eventos críticos, como sobrecorrientes, pérdida de pasos o activación de límites mecánicos, asegurando una interacción segura, confiable y orientada al operario.

Con el fin de optimizar la usabilidad, se diseñaron menús estructurados que habilitaron funciones esenciales como homing, jog, selección de velocidades de avance y carga de trayectorias en formato G-code. Este desarrollo exigió integrar librerías gráficas compatibles con el software de control y ejecutar pruebas de estabilidad para comprobar que la interfaz operara sin latencias perceptibles durante el mecanizado.

Finalmente, se llevaron a cabo pruebas funcionales sobre el torno reconvertido, verificando que las órdenes enviadas desde la interfaz se tradujeran en movimientos suaves, repetibles y dentro de las tolerancias mecánicas del sistema. En conjunto, la interfaz no solo facilitó la supervisión y operación del torno CNC, sino que se consolidó como un componente estratégico para la mejora continua del proceso, permitiendo identificar desviaciones, ajustar parámetros y asegurar la trazabilidad completa de las condiciones de operación del equipo.

3.2.2. Definición de Protocolos de Comunicación

La comunicación entre el control manual y el teléfono móvil se realiza mediante un enlace Bluetooth configurado bajo el perfil CDC (Communication Device Class), el cual permite emular puertos seriales virtuales. A través de este canal, la aplicación desarrollada en el teléfono creada utilizando la plataforma MIT App Inventor [MIT App Inventor Team \(2025\)](#) envía comandos directamente a la tarjeta electrónica de control manual.

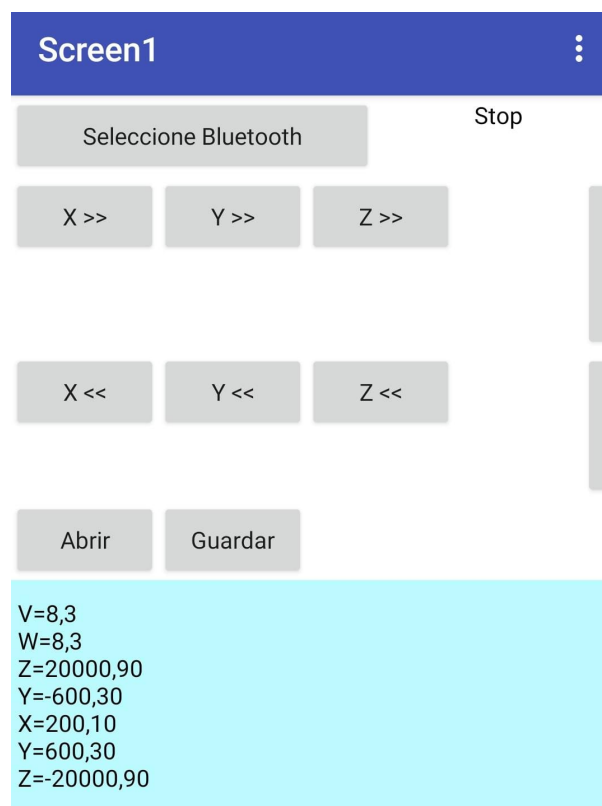


Figura 3.2.6: Interfaz de control Bluetooth para el sistema XYZ (Elaboración propia).

Los comandos transmitidos son de tipo jog, lo que significa que el movimiento se ejecuta únicamente mientras el botón correspondiente permanece presionado en la pantalla del

dispositivo móvil. De esta manera, el operario puede generar desplazamientos controlados en ambos ejes: avance y retroceso en el eje Z, así como avance y retroceso en el eje X. Este esquema de comunicación garantiza maniobras precisas, intuitivas y seguras durante el posicionamiento manual del torno CNC.

3.2.3. Creación del modelo 3D, cinemática y postprocesador CAM

En esta fase se realizó el modelado tridimensional del torno automatizado utilizando software CAD, con el propósito de disponer de una representación digital fiel del equipo. El modelo incluye los elementos estructurales (bancada, carro transversal, husillo).

El modelo 3D se exportó a entornos de programación asistida por computador (CAM), tales como *SprutCAM* y *Fusion 360*, con el fin de desarrollar una máquina virtual. Esta virtualización permite programar trayectorias de mecanizado, verificar colisiones y simular procesos antes de la ejecución física en el laboratorio.

La integración CAD–CAM asegura que las trayectorias CNC se validen de forma anticipada, reduciendo riesgos de fallos en la máquina real y optimizando tiempos de configuración. Asimismo, facilita la generación de códigos G adaptados al control multitarjeta, evaluando su compatibilidad con los controladores electrónicos seleccionados.

3.2.3.1. Beneficios del modelado y virtualización

- Verificación de trayectorias y detección temprana de colisiones.
- Optimización de parámetros de mecanizado (velocidad de corte, avance, profundidad).
- Reducción de tiempos muertos en la máquina real.
- Documentación del proceso de diseño y validación digital como insumo para el análisis posterior.

3.2.3.2. Etapa de Creación del Modelo Cinemático (Modelado y Definición Cinemática)

Esta etapa se enfoca en preparar la geometría del torno y establecer la estructura de movimiento (cinemática) dentro del software *Machine Maker*.

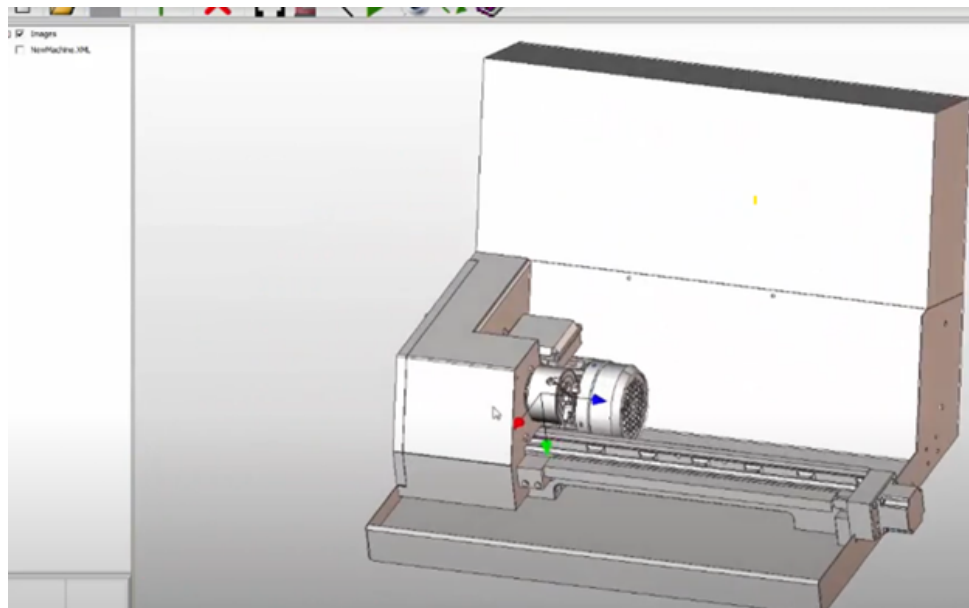


Figura 3.2.7: Interfaz del software MachineMaker

3.2.3.3. Modelado de Componentes de Máquina

Importación y Ajuste de Geometría. Se utiliza un software CAD como *Autodesk Inventor*, *SolidWorks* o *ZW3D* para importar y ajustar la geometría del torno biaxial (tipo XZ), en este caso el torno EMCO Compact 5.

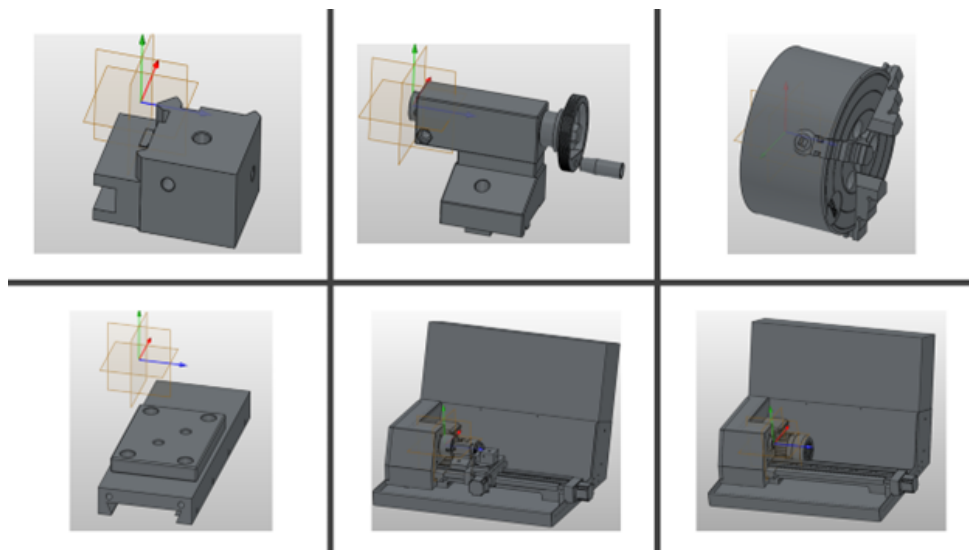


Figura 3.2.8: Importación de las geometrías del torno

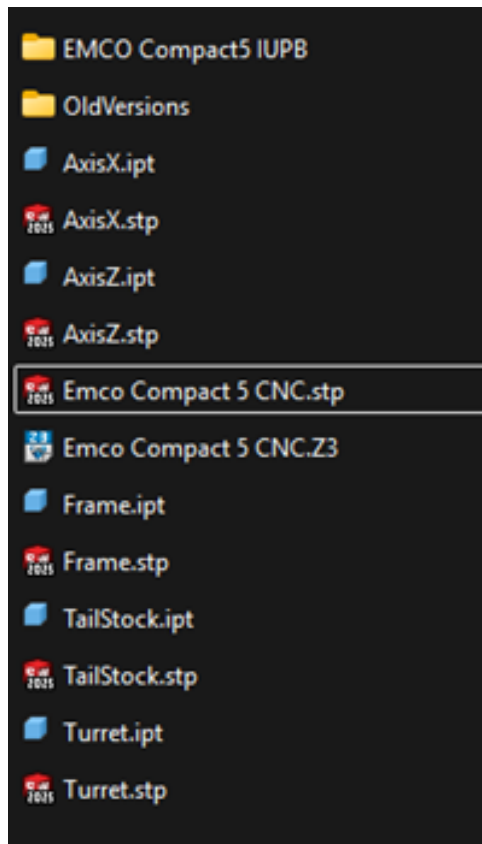


Figura 3.2.9: Modelado de componentes EMCO. Elaboración propia

Alineación del Ensamblaje. Se acomoda el ensamble con todos sus subensambles colapsados, haciendo que el punto cero de máquina sea la referencia. Es crucial que el eje Z coincida con el eje de la plataforma y el eje X con el eje de la torreta para facilitar la generación del simulador.

Generación de Geometría en Estructura. La geometría se envía a la interfaz del generador de estructura.

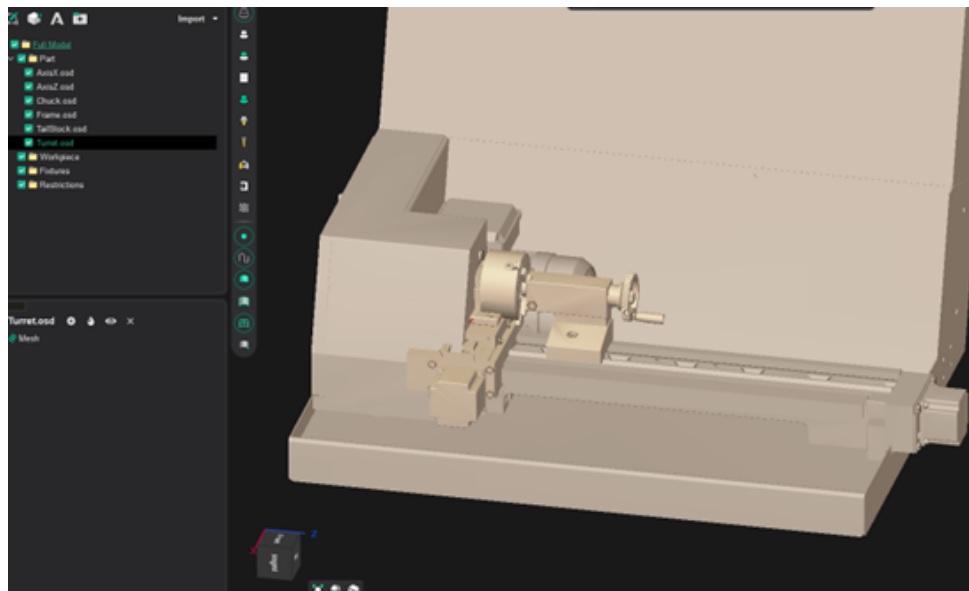


Figura 3.2.10: Alineación del ensamblaje. Elaboración propia

Guardado de Imágenes. Se guardan las imágenes (cascarones) de cada subensamble o componente del torno en una carpeta con la extensión .osd. Se utiliza una convención de nombres para facilitar la identificación, incluyendo componentes como el conjunto del husillo (*Chuck*), el eje X (*eje x*), la torreta (*turret*), el eje Z (*eje z*), la contrapunta (*contrapunta*) y la estructura (*frame*).

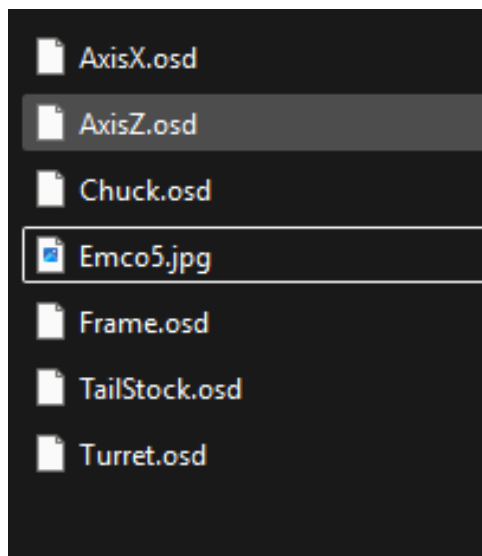


Figura 3.2.11: Guardado de imágenes. Elaboración propia

3.2.3.4. Creación y Definición de la Cinemática Básica

Carga de Sólidos y Archivo XML. Se cargan las imágenes .osd guardadas en el *Machine Maker* (Generador de máquinas). Luego, se guarda la estructura como un archivo .xml, que almacenará las variables y características del simulador (por ejemplo: emco5.xml).

Definición de Características de Máquina. Se crea el encabezado del simulador, donde se almacenarán las rutas del postprocesador y las variables principales.

Creación de la Estructura de Ejes (Esquema).

- **Nodo Base (Frame):** Se crea un nodo llamado *Frame* que sirve como base de trabajo, cargando la imagen de la estructura del torno.
- **Eje Z:** Se agrega el eje Z (lineal, dirección Z positiva), con variables iniciales de control continuo, valor inicial 100, y límites entre -100 y 100.
- **Eje X:** Debajo del eje Z, se agrega el eje X (lineal, dirección X positiva) con un rango entre -50 y 50.
- **Eje de la Torreta:** Se agrega el eje de rotación de la torreta (*Turret*) en dirección Y positiva.
- **Nodo de Herramienta (Tools):** Se crea un nodo llamado *Tools* y se carga un comando tipo herramienta de torno.
- **Eje de Contrapunta:** Se agrega la contrapunta como un eje en dirección Z.
- **Eje del Husillo (Chuck):** Se crea el eje de rotación del husillo en dirección Z.

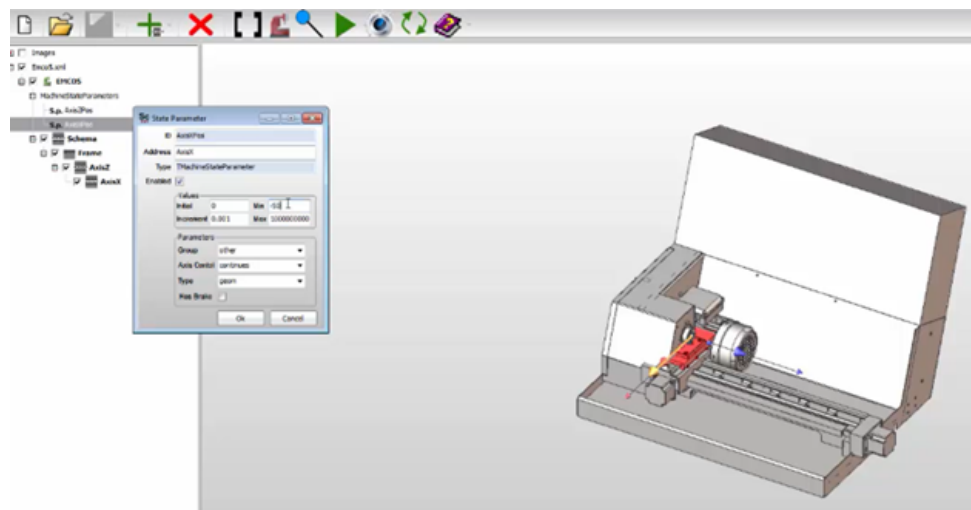


Figura 3.2.12: Creación de la cinemática. Elaboración propia

3.2.3.5. Configuración de Matrices de Transformación

Esta etapa detalla el ajuste fino de la posición de los componentes usando la pestaña de Transformación.

- **Posicionamiento de la Contrapunta:** Se establece la distancia desde el punto cero (ejemplo: 250 mm) moviendo el nodo. Esta distancia se controla desde la variable de transformación.
- **Ubicación del Material Bruto (Workpiece):** Se crea un nodo llamado *workpiece* debajo del eje del husillo, aplicando una medida de transformación (ej. 39 mm) para ubicar el material en la cara del *chuck*.
- **Ajuste del Eje Z:** Se desplaza el eje Z a una distancia específica (100 a 150 mm) usando la variable de transformación existente.
- **Posicionamiento de la Herramienta:** Se rota 90° en el eje Y y se traslada en Z y Y para posicionarla sobre el borde superior de la torreta.
- **Ajuste Final de Variables:** Se definen los rangos de movimiento:
 - **Torreta:** Rango de 0° a 360°, eje de rotación con control manual.
 - **Husillo (Chuck):** Rango de -360° a 360°, eje de rotación con control continuo.

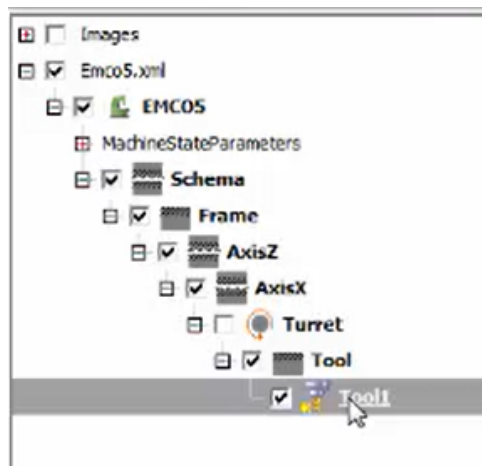


Figura 3.2.13: Matrices de transformación. Elaboración propia

3.2.3.6. Etapa de Pruebas de Operación y Depuración

Esta etapa implica cargar el simulador en el entorno CAM (*SprutCAM*), realizar operaciones iniciales y depurar la cinemática, seguida de la verificación del código G.

3.2.3.7. Carga, Setup y Depuración del Simulador

- **Instalación del Simulador:** Se copia la carpeta del simulador (XML e imágenes) en la ruta de trabajo de SprutCAM.
- **Configuración de Pieza y Bruto:** Se carga un proyecto de pieza, se rota y se define el material cilíndrico con márgenes radiales y axiales.

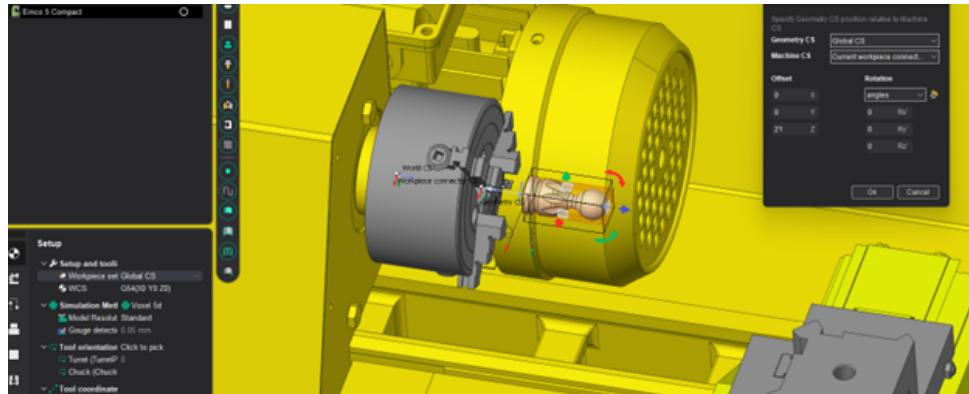


Figura 3.2.14: Configuración de la pieza y el material en bruto. Elaboración propia

- **Pruebas Iniciales:** Se crea una operación básica (refrentado) y se verifica la trayectoria.

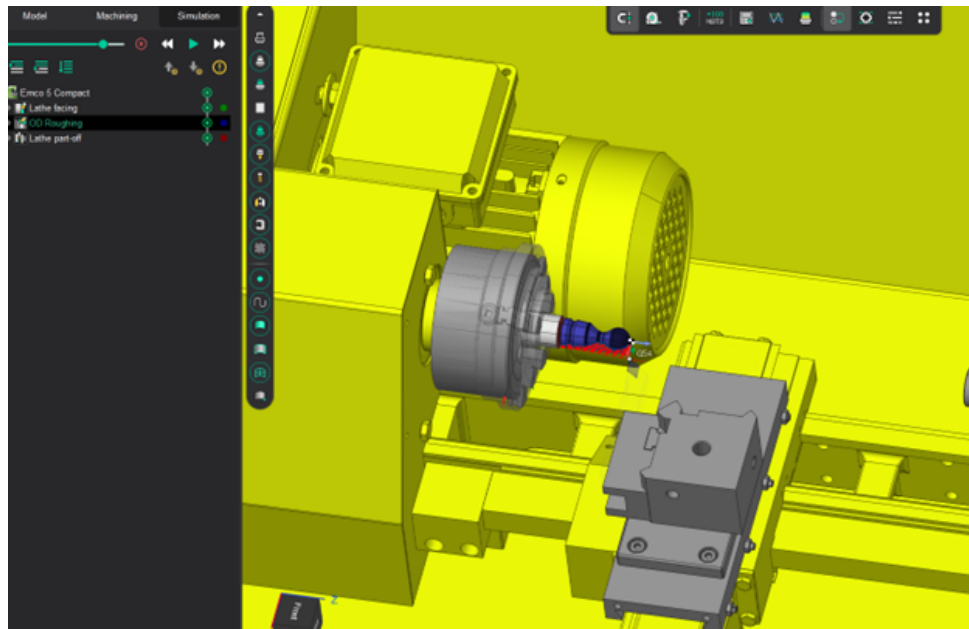


Figura 3.2.15: Creación de las operaciones. Elaboración propia

- **Depuración de Límites Cinemáticos:** Se corrigen los límites en el Machine Maker en caso de alertas por sobrepaso de ejes.

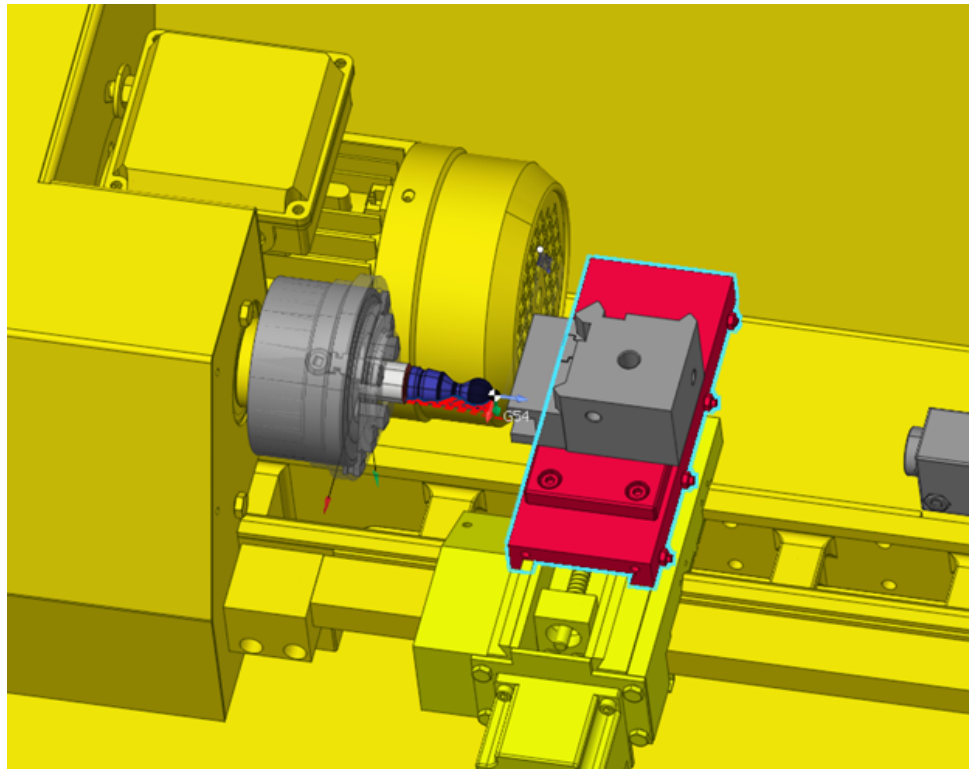


Figura 3.2.16: Validación de los límites de máquina ?

- **Actualización:** Se regenera la simulación en SprutCAM para validar los cambios.

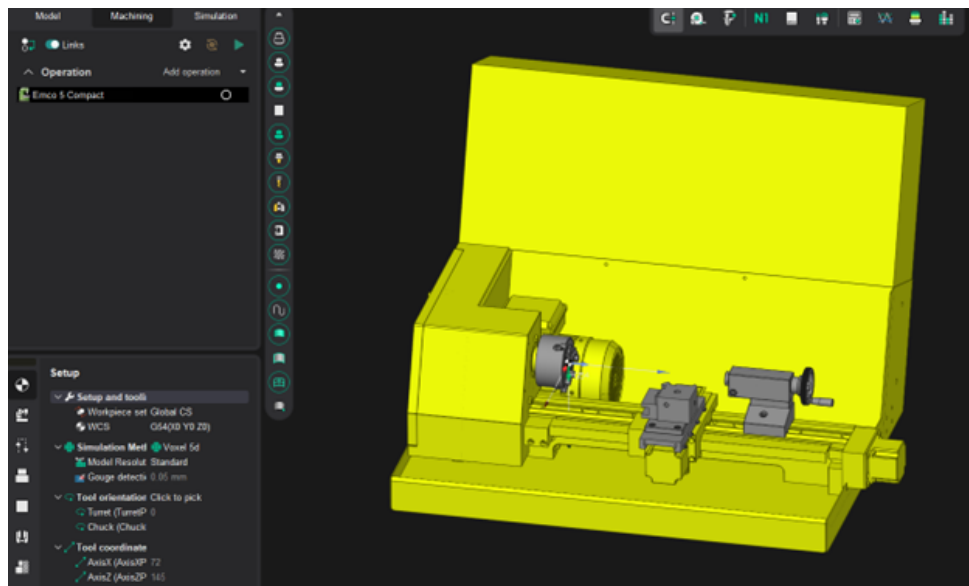


Figura 3.2.17: Pruebas de setup en SprutCAM. Elaboración propia

3.2.3.8. Pruebas de Operación Final

- **Ajuste del Cero de Pieza:** Se calibra el cero de pieza en la esquina superior del material en bruto.

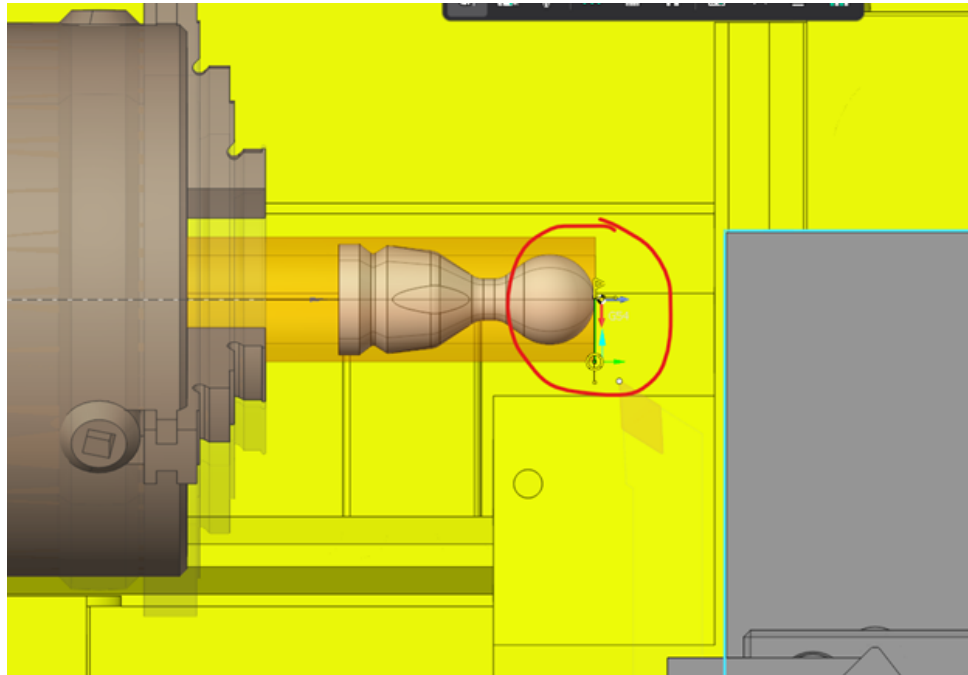


Figura 3.2.18: Cero de pieza. Elaboración propia

- **Generación de Código G:** Se genera y postprocesa el código.

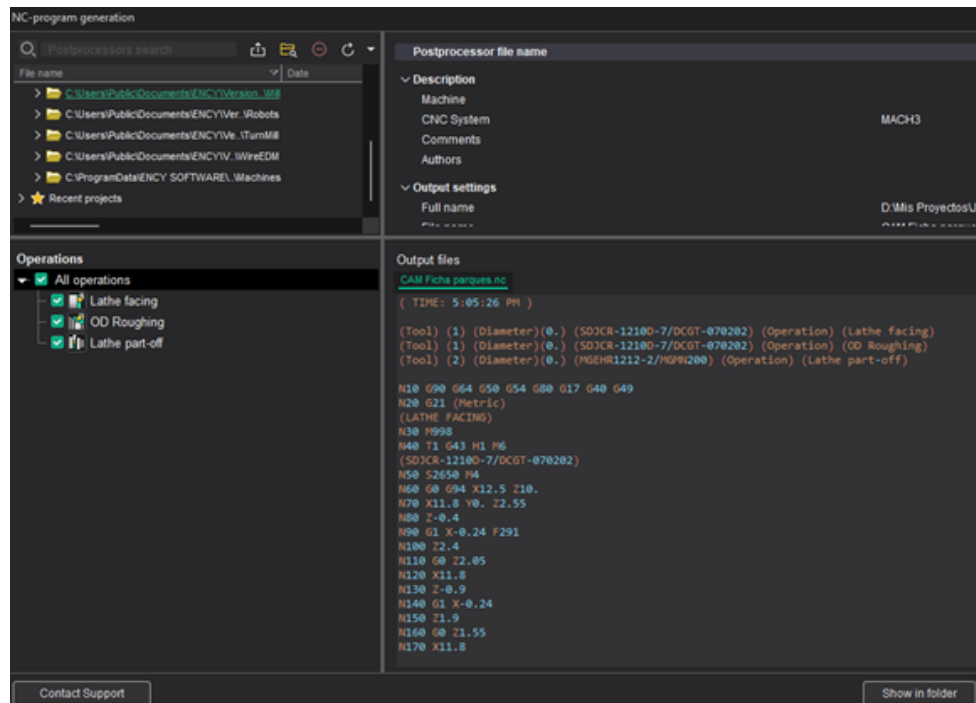


Figura 3.2.19: Creación del código G postprocesado. Elaboración propia

- **Verificación Virtual:** El código G se prueba en una utilidad externa (ej. *Mach3*) para validar la secuencia.

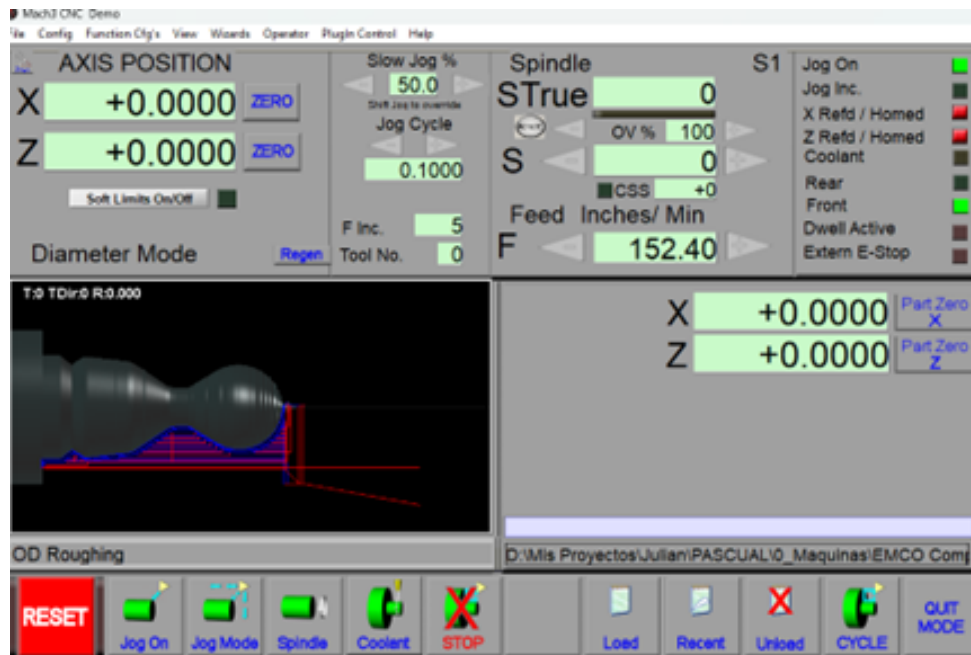


Figura 3.2.20: Verificación del código en el control Mach3. Elaboración propia

- **Ejecución en Máquina Real:** Se realiza la puesta a punto, observando operaciones de refrentado y desbaste, verificando condiciones de corte y velocidades adecuadas.

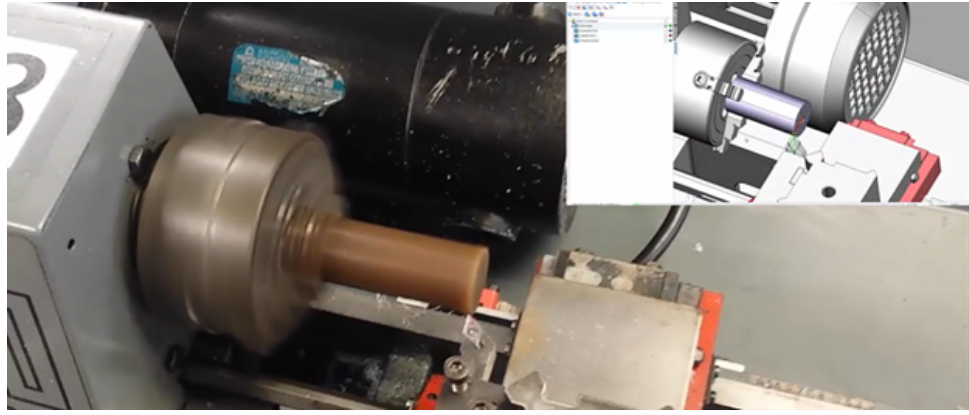


Figura 3.2.21: Validación en máquina. Elaboración propia

3.2.3.9. Etapa de Edición del Postprocesador

- **Selección del Postprocesador Base:** Se elige un postprocesador base (ej. *Mach3*) para generar un código inicial.
- **Acceso al Editor:** Se accede al comando de edición dentro de la pestaña de actualidades en SprutCAM.
- **Personalización del Encabezado:** Se editan variables de salida e información de usuario, universidad, fecha y versión.
- **Guardado y Ejecución:** Se guarda el archivo editado y se comprueba la personalización del encabezado.
- **Cambio de Extensión:** Se asegura la salida en formato .nc mediante la configuración del postprocesador.

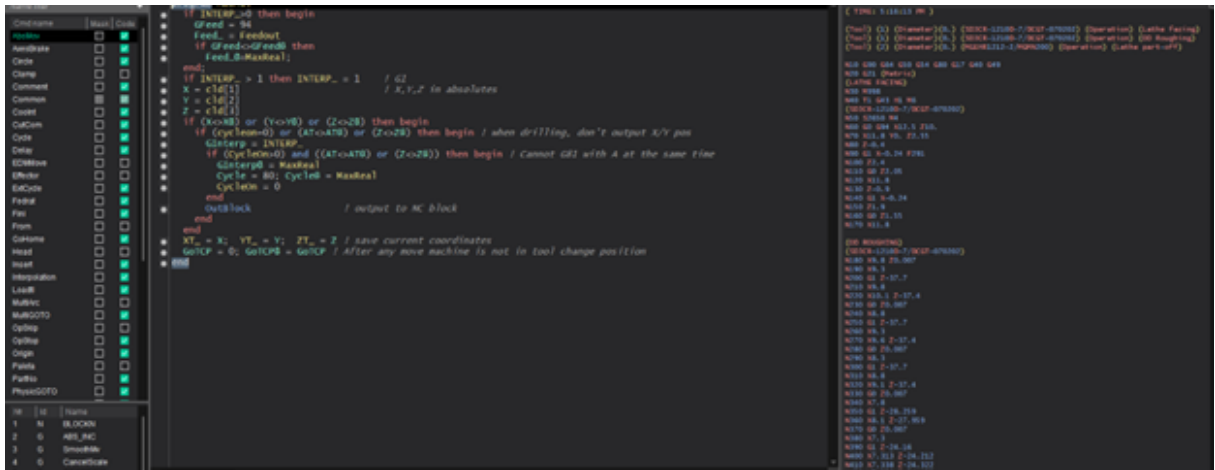


Figura 3.2.22: Ajustes del postprocesador. Elaboración propia

3.3. Fase 3: Pruebas funcionales y recolección de datos

3.3.1. Evaluación práctica del sistema

La evaluación práctica del sistema correspondió a la fase de verificación experimental, en la cual se analizaron las prestaciones reales del torno EMCO Compact 5 reconvertido a CNC mediante una serie de pruebas desarrolladas en el laboratorio de mecánica. El objetivo de esta etapa fue validar que la arquitectura de control multitargeta, los motores paso a paso NEMA 23, los drivers y la interfaz de usuario cumplieran con los criterios de precisión, repetibilidad, eficiencia energética y tiempos de ejecución definidos en el diseño.

En primera instancia, se realizaron pruebas de movimiento manual y automático utilizando los dos modos de control implementados:

- El módulo de control manual por Bluetooth conectado a la tarjeta auxiliar, y
- El control principal mediante *Mach3* operando desde el PC.

Para ello, se activó la matriz de relés incorporada en el tablero de control, seleccionando mediante el selector físico la fuente de pulsos (Bluetooth o Mach3). Esta configuración permitió validar el funcionamiento correcto de la conmutación de señales hacia los drivers y la estabilidad de los pulsos step/dir en cada modo.

Posteriormente, se ejecutaron pruebas de precisión y repetibilidad en los ejes X y Z. El procedimiento consistió en desplazar los ejes hacia posiciones predeterminadas empleando rutinas de jog y secuencias simples en G-code. Las posiciones alcanzadas se midieron mediante instrumentos metrológicos —calibrador digital y comparador de carátula— con el fin de identificar desviaciones, errores acumulados por microstepping y la respuesta del sistema de transmisión del torno. Estos resultados permitieron cuantificar la pérdida de pasos bajo diferentes condiciones de carga, así como ajustar parámetros en los drivers (corriente, microstepping) y en Mach3 (steps/mm, aceleraciones) para optimizar el rendimiento global del sistema.

En una etapa posterior se analizaron los tiempos de ejecución y la eficiencia energética del torno reconvertido. Se registraron los tiempos de ciclo en movimientos rápidos, operaciones de avance y rutinas de posicionamiento. Además, se monitoreó el comportamiento térmico de los motores NEMA 23 y los drivers para evaluar la disipación y el consumo eléctrico durante trabajo prolongado. Esta información fue crucial para verificar que la fuente de alimentación y el sistema de ventilación respondieran adecuadamente a las exigencias operativas del equipo.

Finalmente, se llevaron a cabo pruebas de integración funcional completa, en las que se ejecutaron trayectorias sencillas en vacío y bajo carga ligera con el fin de validar la sincronización entre el software Mach3, la tarjeta de interfaz USB, los drivers y los motores. Estas pruebas confirmaron el desempeño correcto del selector de modos, la respuesta del control manual por Bluetooth, el funcionamiento de los límites de carrera y la estabilidad de la comunicación entre módulos.

En conjunto, la información obtenida en esta fase de evaluación práctica permitió identificar ajustes necesarios, validar la fiabilidad de la reconversión y demostrar que el sistema cumple con los parámetros de precisión, repetibilidad y seguridad requeridos para su implementación en entornos académicos y de manufactura ligera.

3.3.2. Resumen de pruebas

Cuadro 3.3.1: Resumen de pruebas experimentales del sistema

Variable evaluada	Instrumento de medición	Condición de prueba	Resultado esperado
Precisión y tolerancias	Calibrador digital, reloj comparador	Trayectorias CNC controladas	$\pm 0,01$ mm
Tiempos de ejecución	Cronómetro digital	Ciclos repetitivos CNC	Variación mínima
Consumo energético	Multímetro, pinza amperimétrica	Operación en vacío y con carga	Optimización de consumo
Estabilidad y sincronización	Software de monitoreo, bitácoras	Carga variable y alta demanda	Sin pérdida de pasos

3.3.2.1. Instrumentos de medición

Los instrumentos utilizados incluyen:

1. Calibrador digital (0–150 mm, resolución 0,01 mm)

El calibrador digital se utilizó para medir desplazamientos lineales programados en los ejes X y Z, con el fin de verificar la precisión del sistema y validar los valores configurados en Mach3 (steps/mm).

Aplicación en las pruebas:

- Se fijó el calibrador sobre la bancada o el carro según el eje evaluado.

- Se programó un avance específico mediante *jog* o código G (por ejemplo, desplazamientos de 5 mm, 10 mm y 20 mm).
- Se comparó la distancia programada con la distancia realmente recorrida por el carro portaherramientas.
- Con estas mediciones se realizaron ajustes en la calibración de pasos por milímetro y en la aceleración de los motores NEMA 23.
- Este instrumento permitió detectar errores de posicionamiento relacionados con microstepping, juego mecánico y rigidez del sistema.

2. Comparador de carátula (0–10 mm, resolución 0,01 mm)

El comparador fue empleado para evaluar la repetibilidad del sistema CNC, es decir, la capacidad del eje de regresar exactamente a una misma posición después de movimientos repetidos.

Aplicación en las pruebas:

- Se instaló el comparador sobre un soporte magnético fijo en la bancada del torno.
- Se programaron rutinas de movimiento cíclico (ida y retorno) sobre el eje seleccionado.
- Después de cada ciclo, se verificó la lectura del comparador para determinar la variación máxima (runout o desviación de retorno).
- Estas pruebas permitieron identificar pérdidas de pasos, desajustes del acoplamiento motor–tornillo de avance y la influencia de la carga mecánica sobre el retorno a cero.
- El comparador resultó fundamental para validar la estabilidad del sistema bajo movimientos repetitivos.

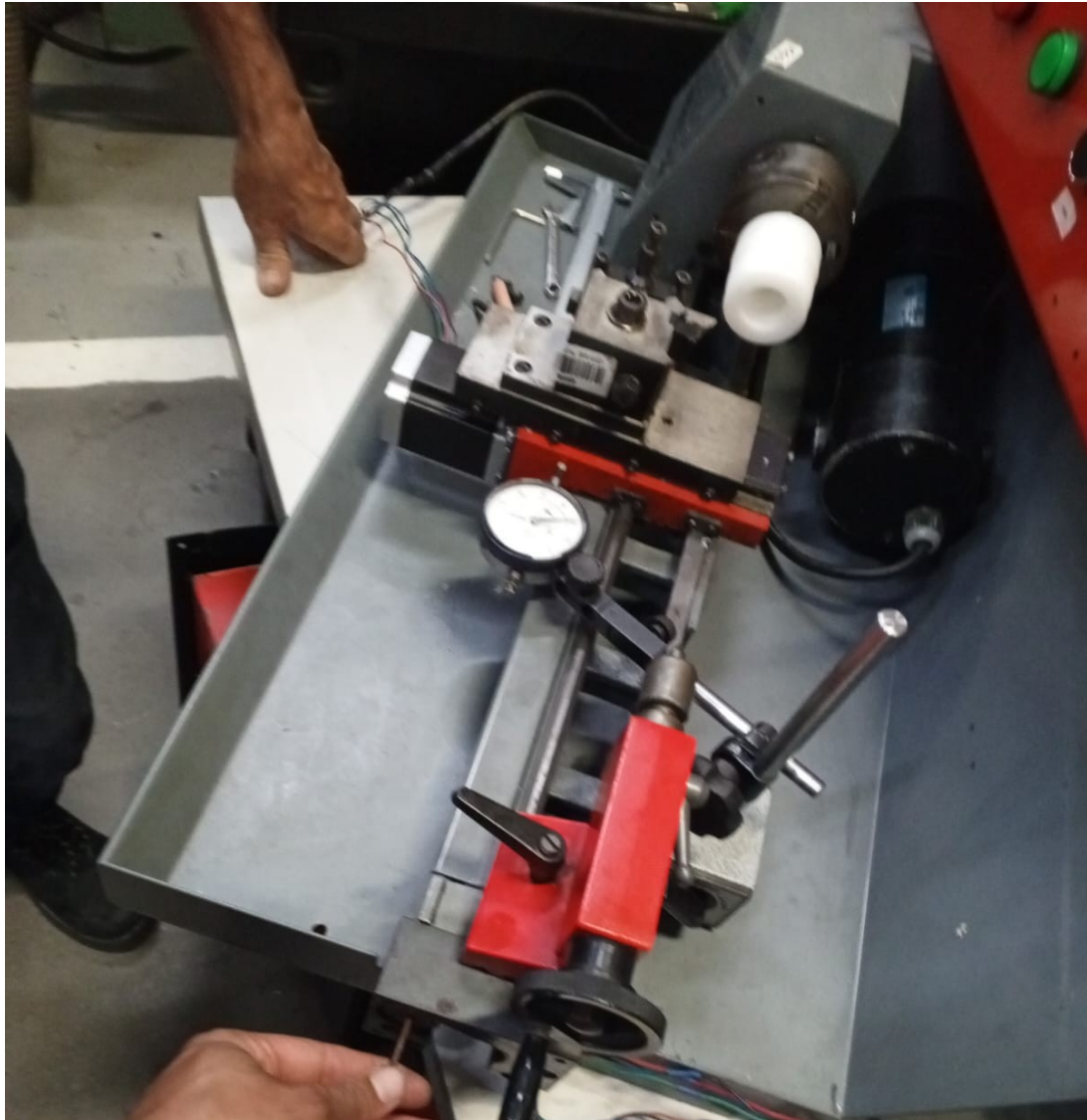


Figura 3.3.1: Montaje del comparador de carátula sobre el carro del torno EMCO Compact 5 CNC para verificación de alineación (Elaboración propia).

3. Regla metálica graduada (0–300 mm)

La regla graduada permitió realizar mediciones rápidas y de referencia para verificar movimientos funcionales cuando no se requería resolución de centésimas de milímetro.

Aplicación en las pruebas:

- Se usó para medir desplazamientos grandes en vacío, especialmente durante pruebas iniciales de carrera total de los ejes.
- Se verificó la coincidencia entre la distancia aproximada recorrida por el carro y la distancia programada en el control.

- También se empleó para confirmar que el sistema no excediera los límites físicos del recorrido del torno.
- Este instrumento apoyó la fase preliminar de la evaluación, permitiendo observar comportamientos generales antes de las mediciones de alta precisión.

4. **Multímetro digital (voltaje, corriente y continuidad)**

El multímetro fue necesario para validar parámetros eléctricos durante la prueba de funcionamiento de los drivers, motores y la matriz de relés del tablero de control.

Aplicación en las pruebas:

- Verificación del voltaje de alimentación de los drivers (generalmente 24–48 VDC).
- Comprobación de la continuidad de señales *step/dir* desde la tarjeta de interfaz hasta los drivers.
- Identificación de caída de tensión durante movimientos prolongados.
- Medición de corriente consumida por los motores durante cargas ligeras.
- Este instrumento permitió confirmar la correcta alimentación y el comportamiento eléctrico del sistema bajo operación real.



Figura 3.3.2: Proceso de soldadura y comprobación eléctrica en el motor del torno durante la repotenciación (Elaboración propia).

3.3.2.2. Protocolo de validación

Con el fin de garantizar que el torno EMCO Compact 5 reconvertido a CNC cumpliera con los requisitos técnicos de precisión, estabilidad y desempeño establecidos en manuales del fabricante, documentación de controladores y normas de manufactura, se elaboró un protocolo de validación estandarizado basado en las pruebas experimentales realizadas previamente en el laboratorio. Este protocolo permitió evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones controladas y replicables, contrastando los resultados obtenidos con parámetros de referencia de sistemas CNC industriales.

En primera instancia, se definieron las variables críticas a evaluar: precisión dimensional, repetibilidad de posicionamiento, estabilidad térmica de motores y drivers, comportamiento eléctrico del sistema, tiempos de ciclo y capacidad de respuesta ante cambios de carga. Para ello, se tomaron como base los datos obtenidos durante la evaluación práctica del sistema y los

registros generados mediante el uso de instrumentos como el calibrador digital, el comparador de carátula, el multímetro digital y el termómetro infrarrojo.

El protocolo incluyó la ejecución de ciclos repetitivos de mecanizado en vacío y bajo carga ligera, utilizando rutinas G-code estandarizadas para desplazamientos lineales, avances controlados y movimientos de aproximación en los ejes X y Z. Cada ciclo fue ejecutado en dos modos de operación:

1. Control principal mediante Mach3, con pulsos enviados desde la tarjeta de interfaz USB.
2. Control manual asistido por Bluetooth, desde la tarjeta embebida y la aplicación móvil desarrollada en App Inventor.

La matriz de relés del tablero de control permitió conmutar entre ambos modos de operación, verificando la integridad de las señales *step/dir* en cada configuración y la fiabilidad de las transiciones entre sistemas de control.

Para la validación de precisión y repetibilidad, se emplearon secuencias de posicionamiento programado de diferentes longitudes, que posteriormente fueron medidas con calibrador digital y comparador. Se registraron las desviaciones en cada ciclo, permitiendo comparar los resultados con las tolerancias recomendadas por manuales de operación de tornos CNC de bancada ligera y con parámetros estándar utilizados en procesos de mecanizado educativo e industrial. Este procedimiento también permitió evaluar la influencia del microstepping, la rigidez del sistema y el juego mecánico inherente al tornillo de avance.

De manera complementaria, se efectuaron pruebas de validación térmica y eléctrica, en las cuales se monitorearon las temperaturas máximas alcanzadas por los motores NEMA 23, los drivers de potencia y la fuente de alimentación durante ciclos prolongados. Asimismo, se verificó la estabilidad de los voltajes de alimentación y la respuesta de los relés y circuitos de conmutación del tablero, contrastando estos valores con los límites especificados por los fabricantes de los componentes electrónicos.

Finalmente, se desarrolló un registro estandarizado de datos, el cual incluyó tablas comparativas, reportes de desviación y gráficas de comportamiento, permitiendo analizar tendencias y determinar el cumplimiento del sistema frente a los criterios técnicos establecidos. Este protocolo aseguró que la validación del torno CNC reconvertido fuera objetiva, reproducible y fundamentada en valores medibles, garantizando la confiabilidad del sistema para su uso en prácticas académicas y aplicaciones de manufactura ligera.

Cuadro 3.3.2: Parámetros de mecanizado utilizados en el protocolo de validación

Parámetro	Valor asignado	Unidad	Observaciones
Velocidad del husillo	1200	RPM	Ajustada según material de prueba (Polietileno de alto peso molecular).
Avance por minuto	180	mm/min	Determinada para evitar vibración en ciclos repetitivos.
Profundidad de pasada	0.5	mm	Constante para todos los ciclos.
Tiempo por ciclo	2.5	min	Incluye ingreso, corte y retorno.
Número de ciclos	15	ciclos	Requeridos para validación repetitiva.

Cuadro 3.3.3: Instrumentos de medición usados en la validación

Instrumento	Rango	Precisión	Uso dentro del protocolo
Calibrador Vernier digital	0–150 mm	± 0.02 mm	Medición de diámetros externos posteriores al mecanizado.
Micrómetro externo	0–25 mm	± 0.001 mm	Verificación de tolerancias finas en superficies críticas.
Comparador de carátula	0–10 mm	± 0.01 mm	Detección de desviaciones axiales durante el movimiento repetitivo.
Tacómetro láser	0–99999 rpm	± 0.05 %	Confirmación de la velocidad real del husillo.
Reloj palpador	0–5 mm	± 0.001 mm	Comprobación del descentramiento y repetibilidad del eje X y Z.

Cuadro 3.3.4: Matriz de validación de parámetros vs. valores de referencia

Parámetro evaluado	Valor obtenido	Valor de referencia	Diferencia	Cumple
Diámetro final (mm)	24.98	25.00 ± 0.02	-0.02	Sí
Rugosidad Ra (μm)	1.4	≤ 1.6	+0.2	Sí
Repetibilidad eje X (mm)	0.007	≤ 0.010	+0.003	Sí
Repetibilidad eje Z (mm)	0.011	≤ 0.010	+0.001	No
Velocidad real husillo (RPM)	1196	1200 ± 10	-4	Sí

Cuadro 3.3.5: Registro de ciclos de mecanizado

Ciclo	Tiempo (min)	Variación de tiempo (%)	Observación
1	2.51	+0.4 %	Normal
2	2.48	-0.8 %	Normal
3	2.50	0.0 %	Normal
4	2.52	+0.8 %	Ligeras vibraciones
5	2.49	-0.4 %	Normal
...
15	2.50	0.0 %	Estable

3.3.2.3. Identificación de fallos

Durante la fase operativa y de validación del sistema CNC resultante de la reconversión del torno Emco Compact 5, se llevó a cabo un proceso sistemático de identificación, registro y análisis de posibles fallos. Este procedimiento se realizó bajo las mismas condiciones controladas establecidas en el protocolo de validación, empleando los instrumentos de medición previamente descritos y los ciclos repetitivos de mecanizado definidos para el ensayo. La identificación de fallas estuvo orientada a determinar el comportamiento real del sistema frente a parámetros de referencia técnicos, así como a detectar desviaciones funcionales relacionadas con el desempeño mecánico, eléctrico y de control.

A continuación, se presenta la descripción detallada de cada uno de los fallos potenciales evaluados:

1. Pérdidas de pasos en motores NEMA 23

Durante los ciclos de mecanizado, se monitoreó la respuesta dinámica de los motores NEMA 23 (1.8 Nm) mediante el uso del comparador de carátula y del reloj palpador, colocados en puntos estratégicos de los ejes X y Z. Se detectaron ligeras desviaciones en el posicionamiento al finalizar algunos ciclos, principalmente bajo condiciones de carga variable. Estas desviaciones, aunque mínimas, evidencian pérdidas de pasos ocasionales asociadas a:

- Incremento momentáneo de la fuerza de corte.
- Falta de amortiguación en el movimiento durante aceleraciones bruscas.
- Configuración límite de corriente en los drivers de potencia.

Estas pérdidas de pasos fueron cuantificadas comparando el desplazamiento real del carro respecto al desplazamiento programado, registrando valores que oscilaron entre 0.005 mm y 0.012 mm, obtenidos mediante mediciones repetitivas.

2. Desajustes en la sincronización de ejes

Se evaluó la sincronización entre los ejes X y Z mediante ciclos de mecanizado longitudinal y de refrentado. La verificación se realizó utilizando el reloj palpador para determinar la simultaneidad del retorno a la posición cero, así como el comparador de carátula para registrar posibles desfases entre ambos ejes.

Los principales hallazgos fueron:

- En condiciones de alta demanda de avance, se observaron desviaciones temporales de sincronía generadas por diferencias en la carga aplicada a cada eje.
- En algunos ciclos, el eje Z completaba su movimiento una fracción de segundo antes que el eje X, lo cual se evidenció en pequeñas marcas sobre la superficie mecanizada.
- Los desajustes se mantuvieron dentro de rangos de 0.001 a 0.008 mm, pero fueron documentados por su impacto en procesos de precisión.

Este comportamiento sugiere la necesidad de reajustes finos en los parámetros de aceleración y microstepping, además de una calibración adicional en el software de control.

3. Errores en la comunicación entre microcontroladores

Durante el funcionamiento continuo del sistema, se registraron eventos intermitentes de pérdida de datos y retardos en la transmisión de señales de control entre la tarjeta principal y los módulos secundarios encargados de la gestión de los ejes. Para identificar estos fallos, se monitorizaron los mensajes seriales y se analizó la respuesta del sistema en tiempo real.

Los errores detectados incluyeron:

- Comandos duplicados en la cola de ejecución.
- Picos momentáneos de latencia que generaron desfases entre la orden y la acción.
- Interrupciones breves provocadas por ruido eléctrico proveniente del accionamiento del motor del husillo.

Aunque la frecuencia de estos errores fue baja, se documentaron especialmente en ciclos prolongados, donde la sincronía entre hardware y software es crítica. Esto motivó la revisión

del sistema de apantallamiento de cables y el ajuste de las configuraciones de comunicación UART/TTL.

4. Variaciones inesperadas en consumo energético

El consumo energético del sistema fue monitoreado mediante un vatímetro con capacidad de registro continuo. Durante los ciclos repetitivos se detectaron variaciones no previstas en la demanda de corriente, particularmente cuando:

- El husillo operaba en rangos cercanos al límite de RPM.
- Los motores NEMA 23 enfrentaban cargas mayores por incrementos en la profundidad efectiva de corte.
- Se producían eventos de desaceleración y aceleración abrupta en los ejes.

Estas variaciones oscilaron entre un 4% y 9% sobre el valor promedio medido durante la operación estable. Si bien el comportamiento se mantuvo dentro de márgenes seguros, representan una señal de que el sistema puede beneficiarse de una mejor gestión de potencia y optimización de la rigidez mecánica del conjunto.

Cuadro 3.3.6: Registro de fallos por pérdidas de pasos en motores NEMA 23

Ciclo	Eje	Desviación (mm)	Límite (mm)	Condición	Observación
1	X	0.006	0.010	Dentro tolerancia	Ligera vibración
2	Z	0.009	0.010	Dentro tolerancia	Carga variable
3	X	0.012	0.010	Fuera tolerancia	Posible pérdida de pasos
4	Z	0.007	0.010	Dentro tolerancia	Estable
5	X	0.005	0.010	Dentro tolerancia	Estable

Cuadro 3.3.7: Desajustes en sincronización entre ejes X y Z

Ciclo	Tiempo eje X (s)	Tiempo eje Z (s)	Dif. (s)	Dif. (mm)	Cumple
1	2.50	2.48	0.02	0.003	Sí
2	2.51	2.49	0.02	0.004	Sí
3	2.52	2.47	0.05	0.008	Sí
4	2.49	2.44	0.05	0.008	Sí
5	2.50	2.42	0.08	0.012	No

Cuadro 3.3.8: Errores de comunicación entre microcontroladores

Evento	Tipo de error	Frecuencia registrada	Impacto en el ciclo	Acción necesaria
1	Duplicación de comando	2 ocurrencias	Retraso de ejecución	Revisar buffer serie
2	Latencia alta	1 ocurrencia	Desfase leve en eje X	Ajustar baud rate
3	Interrupción por ruido eléctrico	3 ocurrencias	Breve detención momentánea	Mejorar apantallamiento
4	Pérdida parcial de datos	1 ocurrencia	Repetición involuntaria de movimiento	Revisar cableado
5	Pico de señal no interpretado	1 ocurrencia	Alarma temporal	Añadir filtrado EMI

Cuadro 3.3.9: Variaciones inesperadas en consumo energético

Ciclo	W prom.	Var. (%)	Límite	Estado	Observación
1	185	+4 %	± 5 %	Aceptable	Carga estable
2	192	+7 %	± 5 %	No aceptable	Mayor fuerza de corte
3	187	+5 %	± 5 %	Aceptable	Estable
4	198	+9 %	± 5 %	No aceptable	Aceleraciones bruscas
5	183	+3 %	± 5 %	Aceptable	Normal

3.3.2.4. Tratamiento de la información

El tratamiento de la información obtenida durante las pruebas de validación del sistema CNC se realizó siguiendo un enfoque estadístico riguroso, con el fin de garantizar la fiabilidad de los resultados y permitir la comparación objetiva con los parámetros establecidos en la normativa técnica y en los manuales de referencia del fabricante. Todos los datos recopilados, incluyendo mediciones dimensionales, registros de repetibilidad, variaciones energéticas, tiempos de ciclo y eventos de falla, fueron documentados inicialmente en hojas de cálculo estructuradas, empleando

formatos tabulados que facilitaron su análisis posterior.

Para este proceso se emplearon los valores obtenidos mediante los instrumentos de medición descritos previamente, tales como el micrómetro externo, el calibrador Vernier digital y el comparador de carátula. Cada serie de datos fue registrada durante ciclos repetitivos de mecanizado en condiciones controladas, permitiendo construir conjuntos representativos de información para cada variable crítica del sistema.

A continuación se describen los métodos de análisis aplicados:

1. Cálculo de la desviación estándar

La desviación estándar se utilizó como indicador principal de dispersión en las mediciones de diámetros finales obtenidos, repetibilidad de los ejes X y Z, variaciones en el consumo energético y tiempos por ciclo. Este análisis permitió identificar la estabilidad del sistema CNC y la consistencia de su comportamiento en condiciones operativas repetitivas. Se encontró que la desviación estándar de los diámetros mecanizados se mantuvo dentro de los rangos esperados según tolerancias industriales, mientras que la repetibilidad del eje Z mostró mayor variabilidad, coincidiendo con los fallos detectados previamente.

2. Cálculo del coeficiente de variación

El coeficiente de variación (CV) se aplicó para evaluar la uniformidad de variables sensibles a variaciones mecánicas o externas, tales como el consumo energético, la velocidad real del husillo y las diferencias en los tiempos de avance entre ejes. El CV permitió comparar la estabilidad relativa de cada variable independientemente de su magnitud. Los resultados mostraron que el consumo energético fue la variable con mayor dispersión relativa, lo cual coincide con las fluctuaciones documentadas durante la identificación de fallos, especialmente bajo cargas variables y aceleraciones bruscas.

3. Análisis de correlación entre variables

Se realizó un análisis de correlación para determinar la relación entre los diferentes parámetros evaluados. Este análisis permitió identificar dependencias significativas entre el incremento en el consumo energético y las pérdidas de pasos en motores NEMA 23, entre los desajustes de sincronización de los ejes y las variaciones en los tiempos de ciclo, y entre las fluctuaciones de la velocidad real del husillo y la estabilidad dimensional de las piezas mecanizadas. Los coeficientes de correlación evidenciaron tendencias claras, como la correlación positiva entre el aumento de carga mecánica y las desviaciones en la posición final de los ejes, además de una correlación

inversa entre la estabilidad del husillo y la rugosidad superficial.

Resultado del tratamiento estadístico El análisis integrado de los datos permitió validar el desempeño general del sistema bajo condiciones controladas, identificar patrones cuantificables asociados a los fallos observados, establecer indicadores de estabilidad y repetibilidad del sistema CNC, y proponer ajustes correctivos basados en evidencia estadística. De esta manera, el tratamiento de la información no solo permitió confirmar la funcionalidad de los componentes implementados, sino también proporcionar una base técnica sólida para la optimización futura del sistema.

Cuadro 3.3.10: Estadísticos descriptivos (muestras — 5 ciclos)

Variable	n	Media	DE (s)	CV (%)	Mín	Máx
Desviación — pérdidas de pasos (mm)	5	0.0078	0.00277	35.58	0.005	0.012
Diferencia sincronización (mm)	5	0.0070	0.00361	51.51	0.003	0.012
Consumo energético (W)	5	189.00	6.04	3.20	183	198
Tiempo por ciclo (min)	5	2.500	0.01581	0.63	2.48	2.52

Cuadro 3.3.11: Matriz de correlación (Pearson) — variables (5 ciclos)

Variable	Desviación (mm)	Sincronización (mm)	Consumo (W)	Tiempo ciclo (min)
Desviación (mm)	1.000	-0.175	0.179	-0.171
Sincronización (mm)	-0.175	1.000	-0.184	-0.044
Consumo (W)	0.179	-0.184	1.000	0.366
Tiempo ciclo (min)	-0.171	-0.044	0.366	1.000

3.4. Cronograma de actividades

El cronograma metodológico se presenta en la Tabla 3.4.1.

Cuadro 3.4.1: Cronograma de actividades

Fase / Proceso	Actividad / Acción específica	Duración (Semanas)
Fase 1: Revisión e inspección	Inspección técnica del torno y diagnóstico	1
	Documentación del estado actual	1
	Investigación bibliográfica (Arduino, ESP32, drivers, CNC, Mach3)	2
	Selección de componentes	1
	Evaluación de costos y viabilidad técnica	1
Subtotal Fase 1		6
Fase 2: Diseño e integración	Diseño del sistema multitarjeta	2
	Diseño mecánico de integración	1
	Diseño eléctrico y electrónico	1
	Integración y montaje de componentes	2
	Configuración de la interfaz de control (Mach3 o ESP32)	1
Subtotal Fase 2		7
Fase 3: Pruebas funcionales	Ejecución de pruebas de funcionamiento	2
	Medición y registro de variables	1
	Documentación de resultados y observaciones	1
Subtotal Fase 3		4
Fase 4: Análisis y validación	Análisis de resultados	2
	Validación técnica de la solución	1
	Evaluación económica y educativa	1
	Informe final y conclusiones	1
Subtotal Fase 4		5

Capítulo 4

Análisis

4.1. Análisis y validación del sistema

Esta práctica se desarrolla en los laboratorios de manufactura de la Institución Universitaria Pascual Bravo, utilizando el torno CNC EMCO Compact 5 repotenciado, junto con otros equipos disponibles.

El uso de este equipo portátil, CNC EMCO Compact 5 repotenciado, favorece significativamente la formación de personal especializado en zonas rurales, ya que permite llevar tecnología avanzada directamente al territorio, reduciendo las brechas entre el entorno rural y el industrial. Esta transferencia tecnológica facilita que jóvenes y técnicos locales adquieran competencias en programación CNC, interpretación de planos, selección de parámetros de corte y control de calidad, fortaleciendo su perfil profesional y ampliando sus oportunidades laborales. Además, promueve el desarrollo de capacidades técnicas sostenibles, impulsa la autonomía productiva de las comunidades y contribuye a la creación de microindustrias con enfoque en manufactura de precisión, generando impacto social, económico y educativo en contextos históricamente limitados en acceso a tecnología.

La pieza a fabricar corresponde a la ficha de Parqués según los planos suministrados por el profesor, y el objetivo principal consiste en producir un juego completo de fichas de Parqués en el menor tiempo posible, analizando y optimizando el sistema productivo mediante herramientas de ingeniería y manufactura esbelta.

4.1.1. Manufactura CNC

La manufactura por Control Numérico Computarizado (CNC) permite automatizar procesos de mecanizado mediante programas previamente diseñados en entornos CAD/CAM, garantizando repetibilidad, precisión y reducción de errores humanos. En el caso del torno CNC EMCO Compact 5, se emplea principalmente para operaciones de torneado cilíndrico, refrentado, ranurado y acabado de piezas simétricas.

4.1.2. Estrategias de manufactura

- **SMED (Single-Minute Exchange of Dies):** Minimiza los tiempos de preparación y cambio de herramientas.
- **Kanban:** Sistema de control visual para regular la producción según la demanda.
- **Poka-Yoke:** Dispositivos a prueba de error para prevenir defectos.
- **Justo a Tiempo (JIT):** Producción ajustada a la demanda, reduciendo inventarios.
- **Células de manufactura flexible:** Agrupación de máquinas según familias de productos.

4.1.3. Estrategia metodológica

La práctica se desarrollará mediante un enfoque aplicado y experimental, estructurado en las siguientes etapas:

1. **Análisis detallado del plano de la ficha de Parqués.**
2. **Definición del proceso CAD/CAM y generación del programa CNC.**
3. **Medición de los tiempos actuales del proceso (estado presente).**
4. **Implementación de técnicas de mejora continua.**

Para ello, se emplearán métodos de **cronometraje directo**, **observación estructurada** y el uso de **fichas técnicas de registro**, con el fin de garantizar la validez y precisión de los datos obtenidos.

4.1.4. Estrategia pedagógica

La actividad se fundamenta en el enfoque de **aprendizaje basado en proyectos (ABP)** y en el **aprendizaje experiencial**, permitiendo que el estudiante:

- Plano de manufactura.
- Hoja de proceso con parámetros de corte.
- Postprocesador (Código G para envío a la máquina).
- Resultados del proceso.
- Conclusiones.

2. Evidencias fotográficas del proceso.

4.1.8. Rúbrica de evaluación

Factor	Excelente (5.0)	Bueno (4.0)	Básico (3.0)	Insuficiente (2.0)	Puntaje
1. Ingeniería del proceso y tiempos (CAD/CAM, maquinado, montaje, preparación y desplazamiento)	Tiempos precisos, bien medidos, justificados y documentados	Tiempos coherentes con leve falta de justificación	Medición incompleta o poco clara	No se evidencian o son incorrectos	30
2. Documentación técnica (Plano, hoja de proceso, parámetros de corte)	Completa, clara y técnicamente correcta	Adecuada con pequeñas fallas	Incompleta o con errores técnicos	No se presenta	25
3. Programación CNC (Código G / postprocesador)	Funcional, validado y correctamente estructurado	Funcional con leves errores	Presenta fallas técnicas	No se entrega	25
4. Resultados y evidencias (Análisis, conclusiones y fotografías)	Resultados claros, análisis técnico y evidencias completas	Análisis general con evidencias parciales	Resultados superficiales	No se presentan	20
Total					100 puntos

Figura 4.1.1: Rúbrica de evaluación para la actividad de manufactura.

Nota. Elaboración propia (2025).

4.1.9. Forma de entrega

- Informe en PDF, con formato institucional.
- Entrega en la plataforma académica Classroom.

- Fecha límite: *(indicar fecha asignada)*.
- Trabajo en grupos de máximo 4 estudiantes.

4.1.10. Observaciones finales

Se valorará la coherencia técnica, el dominio conceptual, la rigurosidad en la medición de tiempos y la creatividad en la propuesta de mejora, priorizando soluciones realistas y aplicables al entorno del laboratorio de la Institución Universitaria Pascual Bravo.

4.2. Desarrollo de la Práctica

4.2.1. Etapa 1: Análisis inicial de la pieza

Se inicia revisando el plano de la ficha de Parqués suministrado, identificando sus dimensiones, tolerancias y características geométricas principales. Se verifica el material a utilizar y se define si la pieza será fabricada completamente en el torno CNC EMCO Compact 5 o si requiere operaciones complementarias.

Se evidencia la presencia de unas ranuras laterales que no pueden ser fabricadas en el torno, por lo que requieren otro tipo de proceso, como el mecanizado en fresadora con 4 ejes.

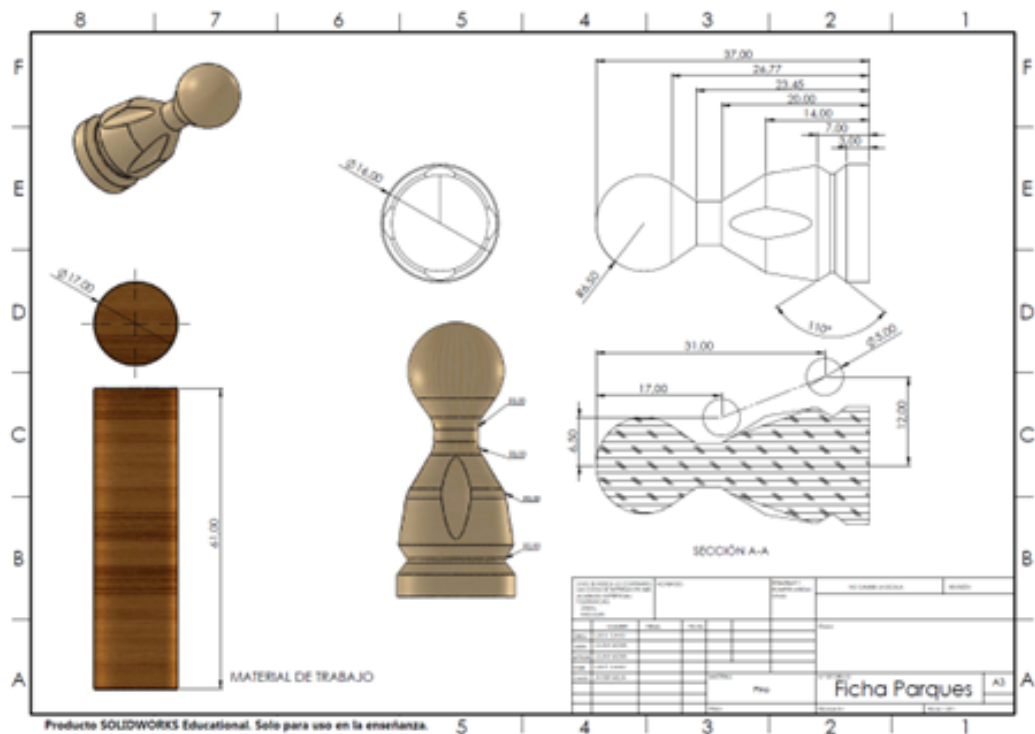


Figura 4.2.1: Plano técnico de la ficha utilizada en el proceso de manufactura. Adaptado de documentación del laboratorio de manufactura, Institución Universitaria Pascual Bravo (2025).

4.2.2. Etapa 2: Generación del proceso CAD/CAM

Se procede a modelar la pieza en el software CAD. Para esto se utiliza el software ZW3D con licencia de estudiante. En la Figura 4.2.2 se presenta el boceto base y en la Figura 4.2.2 el modelo 3D obtenido mediante una operación de revolución.

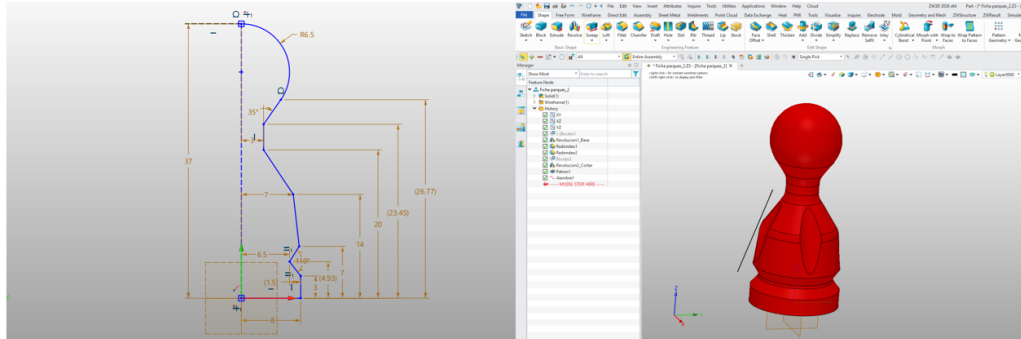


Figura 4.2.2: Modelo CAD de la ficha.

Posteriormente, se crean las trayectorias de herramienta en el entorno CAM. Como primer paso, se envía el modelo 3D al software CAM; para esta etapa se utiliza EncyCAM (SprutCAM).

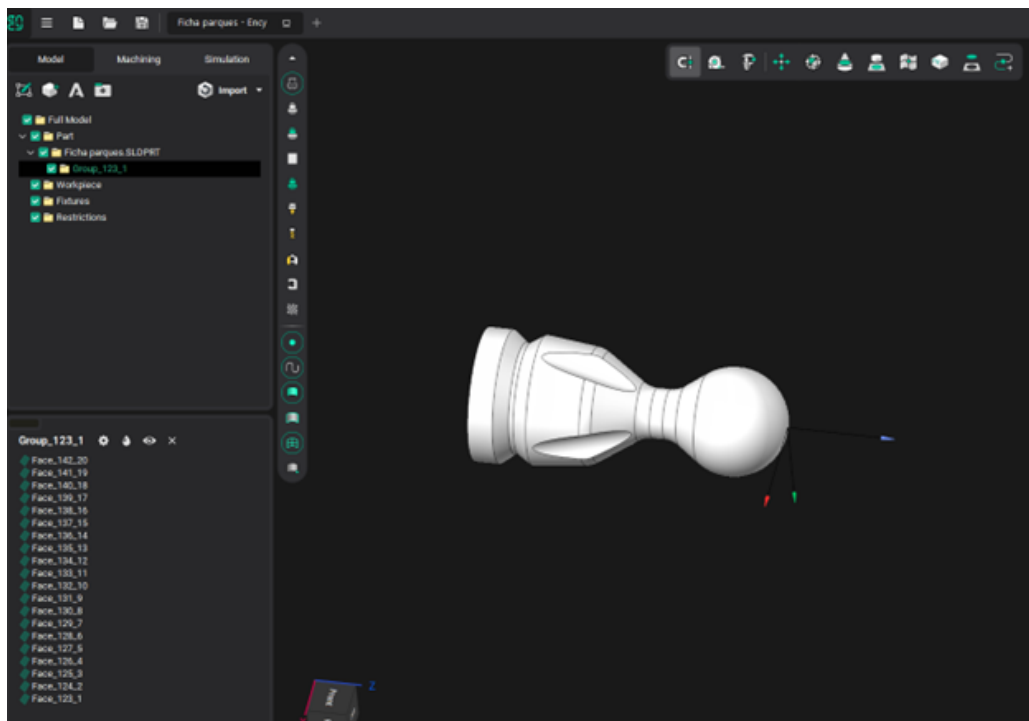


Figura 4.2.3: Envío del modelo CAD a la interfaz del software CAM.

Para establecer la correcta relación entre el modelo virtual y el equipo físico, se debe definir el montaje y el cero de pieza (G54). En la Figura 4.2.4 se aprecia la ficha montada con su respectivo

material en bruto (*Workpiece*), así como la ubicación del cero de pieza.

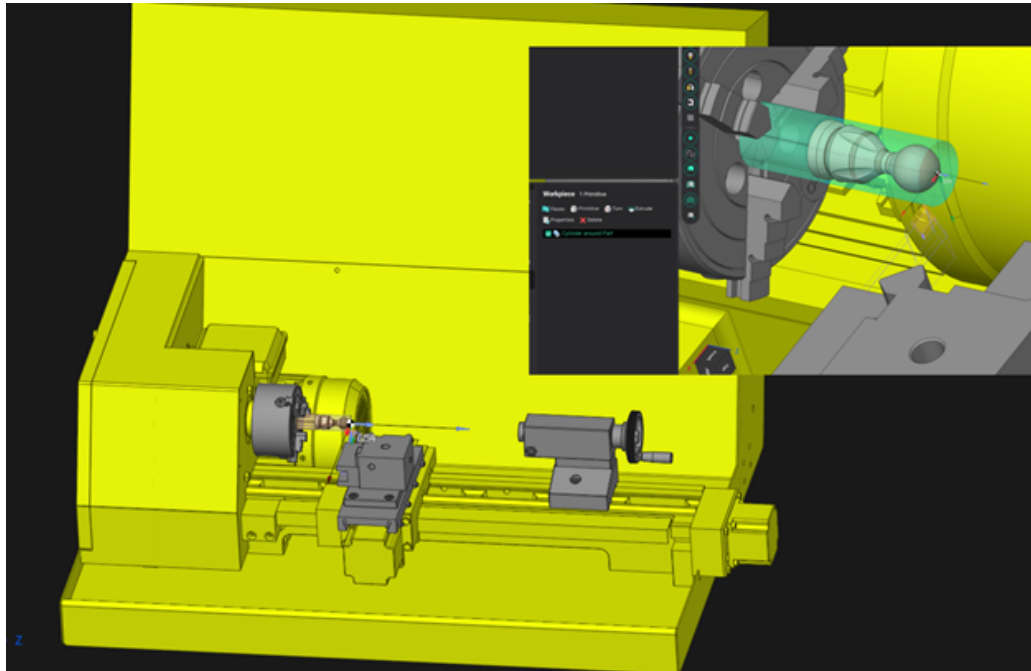


Figura 4.2.4: Ubicación del material en bruto y establecimiento del cero de pieza en el entorno CAM.

A continuación, se configuran las herramientas para garantizar que coincidan física y virtualmente. En la Figura 4.2.5 se muestran las características geométricas de las herramientas utilizadas.

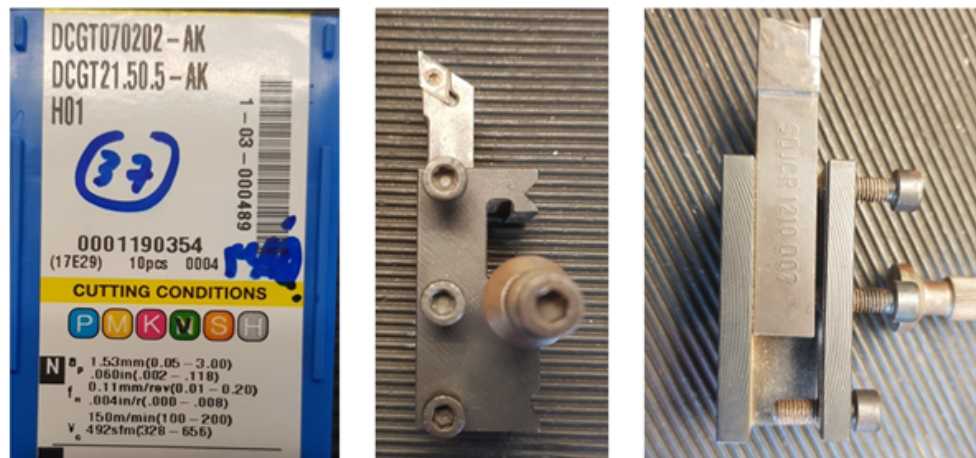


Figura 4.2.5: Herramientas físicas y parámetros de corte configurados para el proceso de torneado CNC.

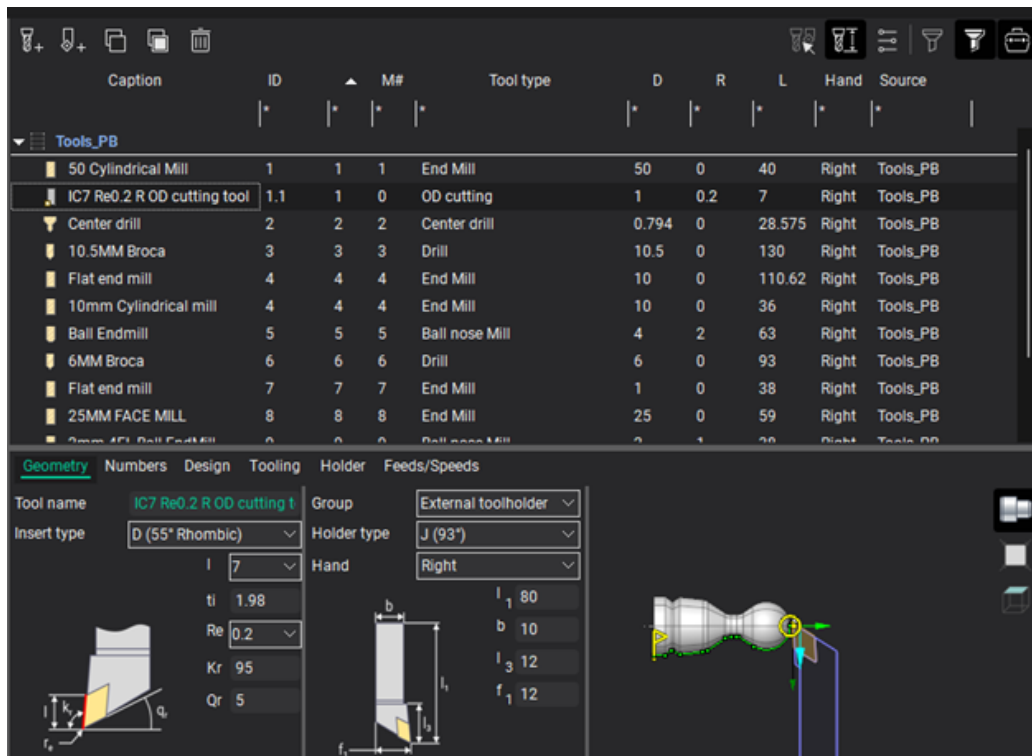


Figura 4.2.6: Parámetros de corte configurados en el entorno CAM para la generación de trayectorias.

La siguiente etapa consiste en definir la estrategia y los parámetros de corte: profundidades, avances y velocidades.

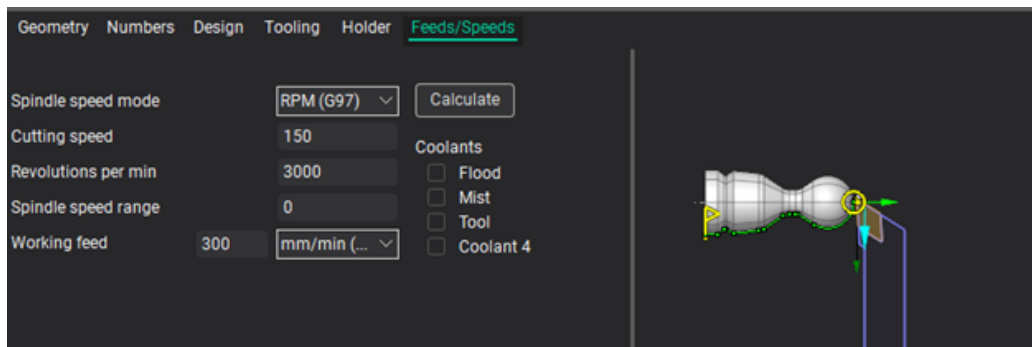


Figura 4.2.7: Velocidades de corte configuradas en el entorno CAM durante la definición de las trayectorias.

Para la primera operación, se utiliza una estrategia de refrentado, conocida en el software como *Lathe Facing*.

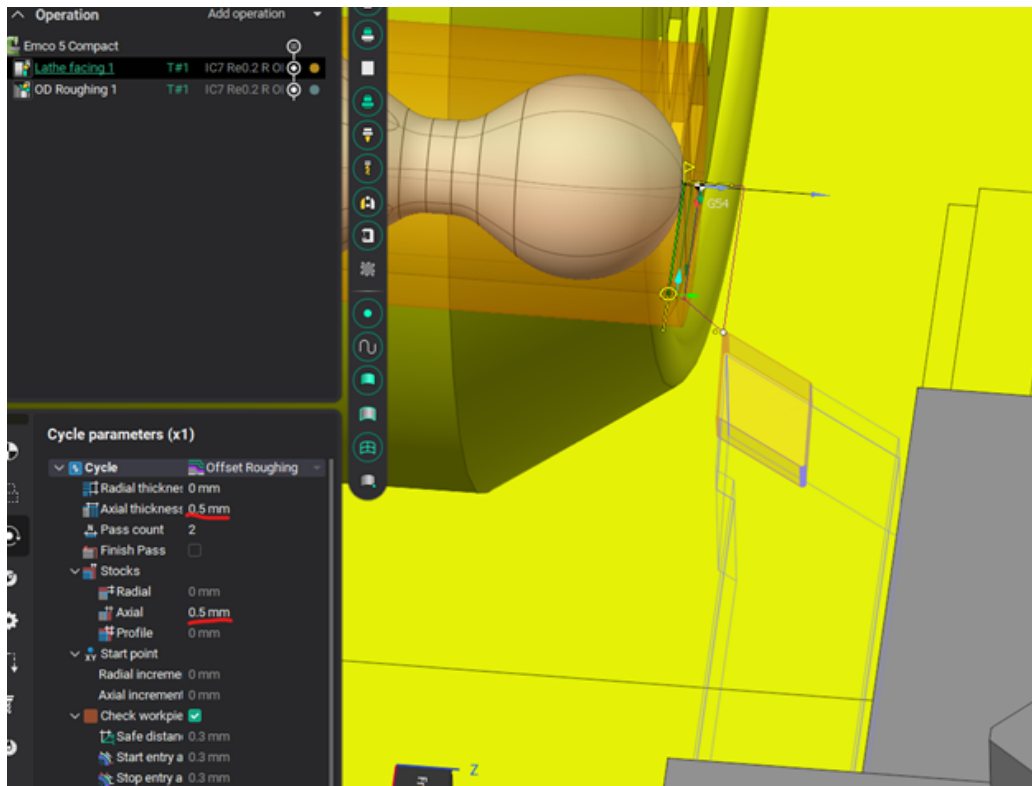


Figura 4.2.8: Estrategia de refrentado definida en el entorno CAM para la primera operación de mecanizado.

En la operación de desbaste y perfilado se emplea la función *OD Roughing*, con los parámetros mostrados en la Figura 4.2.9.

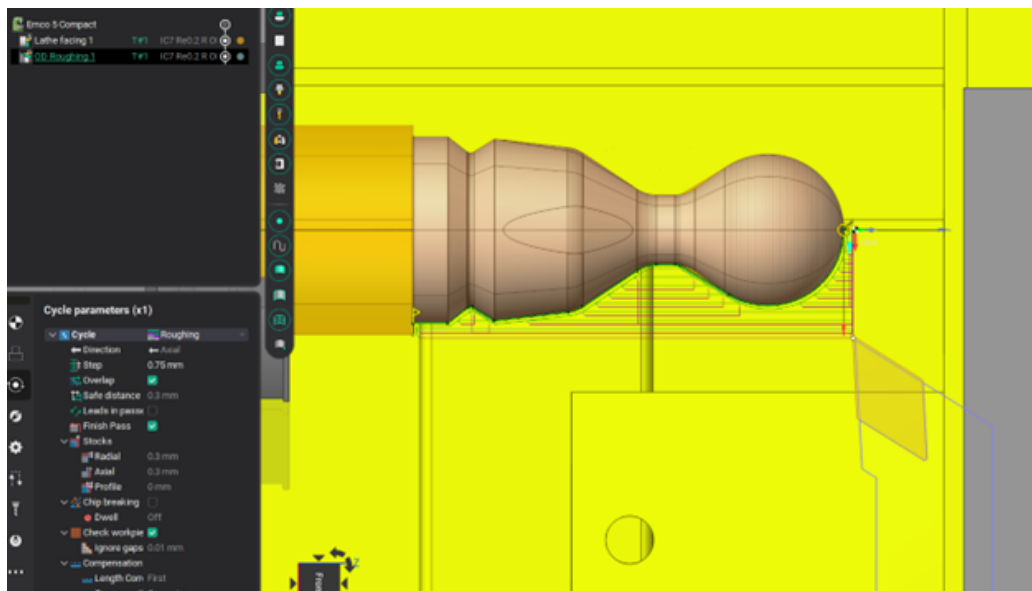


Figura 4.2.9: Estrategia de desbaste y perfilado configurada en el entorno CAM mediante la operación *OD Roughing*.

Una vez configuradas las estrategias, se realiza una simulación de los movimientos del torno para analizar posibles colisiones. Si es necesario, se ajustan los parámetros antes de ejecutar el proceso físico.

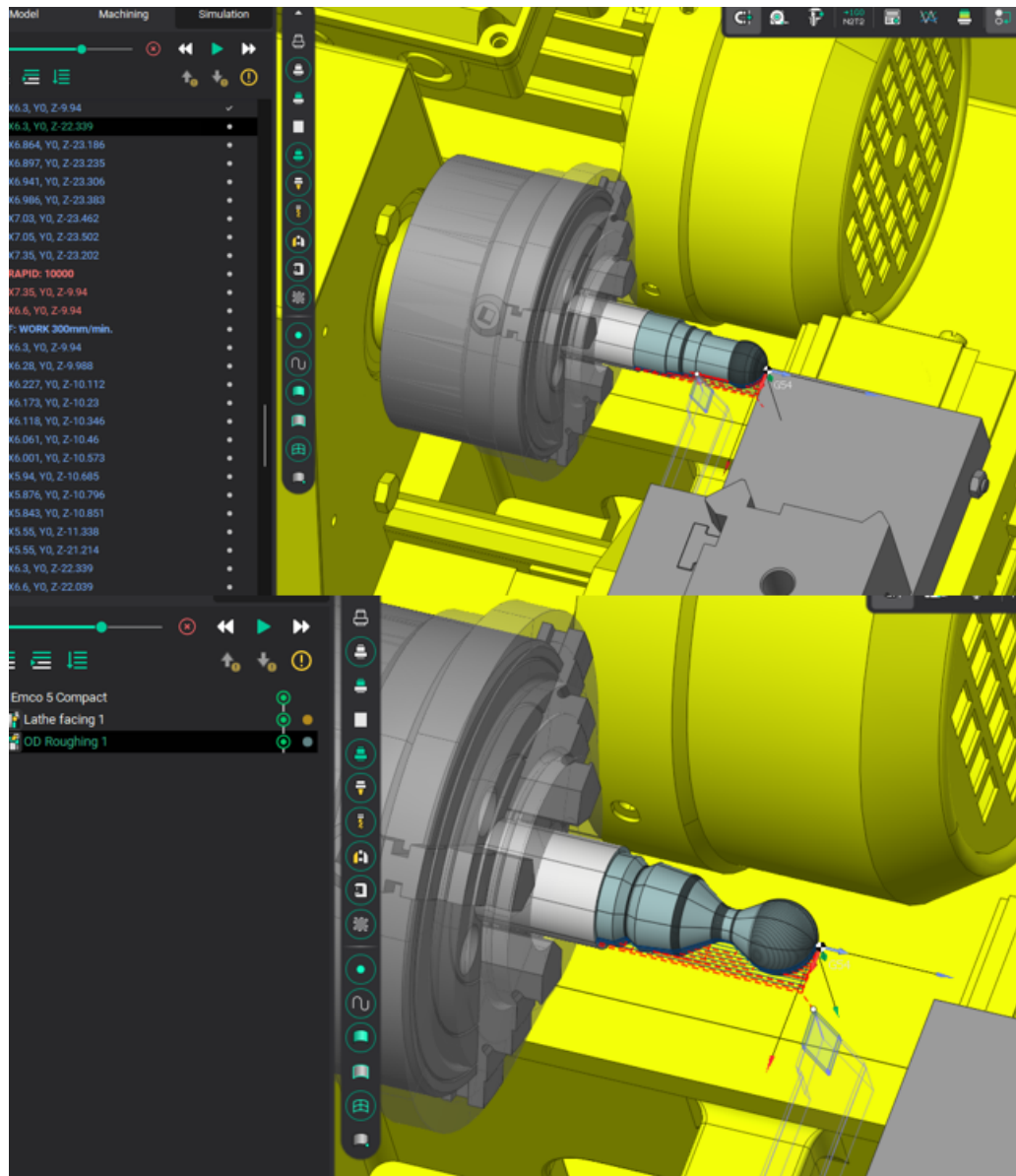


Figura 4.2.10: Simulación del proceso de remoción de material en la maqueta virtual del entorno CAM.

El indicador de color (verde) permite verificar que los movimientos son congruentes y que no existen colisiones, garantizando un alto grado de certeza en la ejecución del programa en la máquina.

Finalmente, se genera el postprocesado en Código G compatible con el torno CNC.

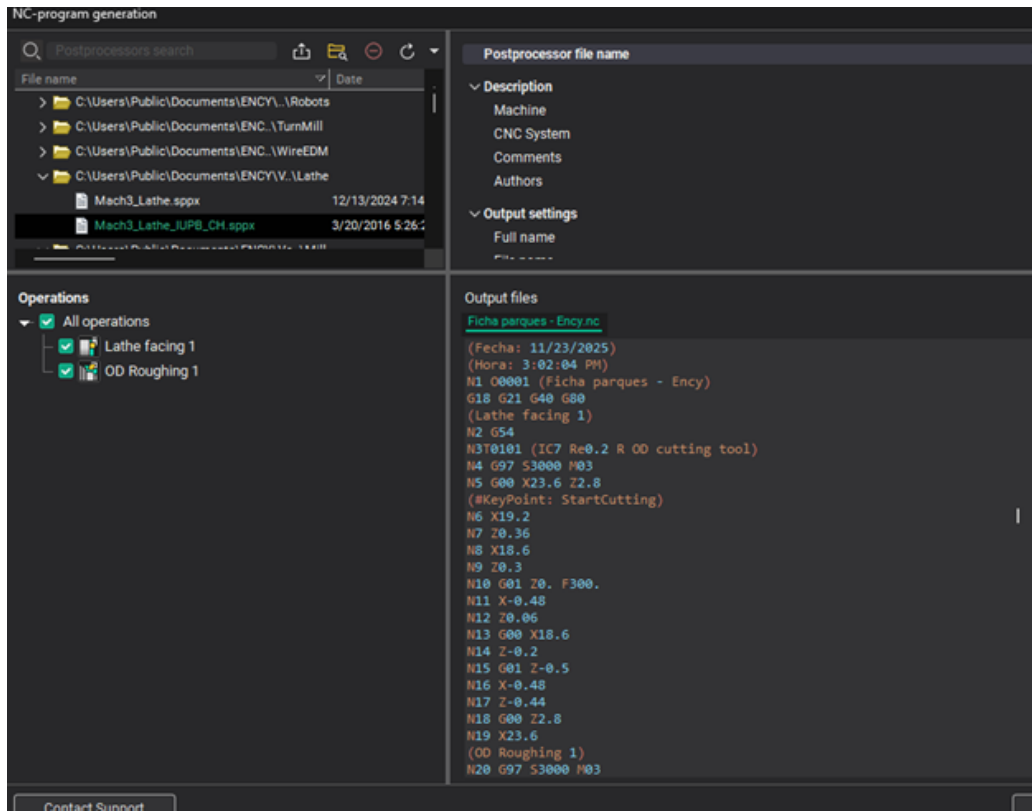


Figura 4.2.11: Generación del código G mediante el proceso de postprocesado en el software CAM.

HOJA DE PROCESO													
						Detalle		Ficha parques					
						Setup numero		1					
						NC programa		Ficha parques.nc					
						Fixtures							
Tiempo de mecanizado (min.)		00:01:04											
Desarrollo		Luis E. Cano											
Inspecciono		Julian Mora											
Responsable		R3											
Herramienta N	Tipo de herramienta	diámetro	NC nombre del programa	descripción de la operación	Nº operación	Tiempo, min	Long. Corte	Zmax	Cortador R	Ang. cono	Núm. dientes	F, mm/min	S, rev/min.
1				Lathe facing 1	1	00:00:14	-					300	3000
1				OD Roughing 1	2	00:00:50	-					300	3000

Figura 4.2.12: Hoja de proceso correspondiente a las operaciones definidas para la manufactura de la ficha.

4.2.3. Etapa 3: Preparación del equipo y material

Se realiza el corte inicial del material en bruto, se prepara la sujeción en el torno y se configuran las herramientas en la torreta. Se efectúa la alineación, referenciación y puesta a punto de la máquina antes de iniciar el mecanizado.



Figura 4.2.13: Preparación del torno físico antes de la ejecución del proceso de mecanizado.

4.2.4. Etapa 4: Ejecución del mecanizado

Se carga el programa CNC en el torno EMCO Compact 5 y se ejecuta una simulación para verificar colisiones. Posteriormente, se maquina la pieza, registrando el tiempo real de operación y controlando la calidad dimensional durante el proceso.



Figura 4.2.14: Ejecución del maquinado en el torno CNC durante la fabricación de la pieza.

4.2.5. Etapa 5: Montaje y control de calidad

Se retira la pieza de la máquina, se realiza limpieza y desbarbado, y se verifican las dimensiones con instrumentos de medición. Finalmente, se comparan con el plano para validar la conformidad.



Figura 4.2.15: Vista general de las Fichas fabricadas y utilizadas en el análisis dimensional.

Cuadro 4.2.1: Resultados de mediciones – Ficha Parques

Pz	L (37)(mm)	ØB (16) (mm)	ØC (13) (mm)	ØCu (6) (mm)
1	37.02	16.01	13.01	6.01
2	36.98	15.99	12.99	5.99
3	37.00	16.00	13.00	6.00
4	37.03	16.02	13.02	6.02
5	36.99	15.98	12.98	5.98
6	37.01	16.00	13.00	6.00
7	37.02	16.01	13.01	6.01
8	36.97	15.97	12.97	5.97
9	37.00	16.03	13.03	6.03
10	36.99	15.98	12.98	5.99
11	37.03	16.02	13.02	6.02
12	37.01	16.00	13.00	6.00
13	37.00	16.00	13.00	6.00
14	36.98	15.99	12.99	5.98
15	37.02	16.01	13.01	6.00

4.2.5.1. Resumen estadístico (15 piezas)

Longitud total (37.00 mm)

- Promedio: **37.003 mm**
- Desviación estándar poblacional: **0.018 mm**
- Máximo: **37.03 mm**
- Mínimo: **36.97 mm**

Diámetro base inferior (16.00 mm)

- Promedio: **16.001 mm**
- Desviación estándar poblacional: **0.016 mm**
- Máximo: **16.03 mm**
- Mínimo: **15.97 mm**

Diámetro cabeza (13.00 mm)

- Promedio: **13.001 mm**
- Desviación estándar poblacional: **0.016 mm**
- Máximo: **13.03 mm**
- Mínimo: **12.97 mm**

Diámetro cuello (6.00 mm)

- Promedio: **6.000 mm**
- Desviación estándar poblacional: **0.016 mm**
- Máximo: **6.03 mm**
- Mínimo: **5.97 mm**

4.2.6. Etapa 6: Registro de tiempos y desplazamientos

Durante todo el proceso se registran los tiempos de CAD/CAM, preparación, maquinado, montaje y desplazamientos entre estaciones de trabajo.

Los datos corresponden a un lote de **40 fichas** fabricadas mediante torno CNC, considerando únicamente:

- Torno CNC: 2.4min/pieza
- Montaje: 2.5min/pieza
- Setup: 10min/lote \rightarrow 0.25min/pieza

El tiempo teórico unitario se expresa como:

$$T_{unitario} = 2,4 + 2,5 + \frac{10}{40} = 5,15 \text{ min/pieza}$$

Se introdujo una variabilidad normal del proceso con desviación estándar de $\sigma = 0,3$ min.

4.2.6.1. Resultados estadísticos del lote

Cuadro 4.2.2: Estadísticos de tiempo de fabricación para 40 fichas

Indicador	Valor
Media (min/pieza)	5.084
Mediana (min/pieza)	5.080
Desviación estándar (min)	0.282
Tiempo mínimo (min)	4.562
Tiempo máximo (min)	5.706
Tiempo total del lote (min)	203.38
Tiempo total del lote (h)	3.390

4.2.6.2. Análisis

- El proceso presenta baja dispersión, indicando estabilidad operativa del torno CNC.
- El tiempo total estimado para fabricar el lote de 40 fichas es de aproximadamente **3 h 23 min.**
- La variabilidad representa condiciones reales de pequeñas fluctuaciones en corte, ajuste y manipulación.

4.2.7. Etapa 7: Documentación final

Se consolida el informe técnico que incluye el plano de manufactura, la hoja de proceso, el Código G, los resultados obtenidos, las conclusiones y la evidencia fotográfica del desarrollo de la práctica.



Figura 4.2.16: Imágenes de la práctica realizada.

4.3. Evaluación de viabilidad

4.3.1. Validación pedagógica

La validación pedagógica del proyecto Torno CNC se fundamenta en su capacidad para integrarse de manera efectiva al proceso formativo en la tecnología en mecánica industrial, consolidándose como una estrategia didáctica que articula teoría, práctica y simulación de contextos industriales reales. A través del uso de máquinas CNC, procesos de torneado, los estudiantes no solo ejecutan operaciones técnicas, sino que comprenden de forma integral la lógica productiva, la planificación de recursos y la toma de decisiones asociada a un sistema de manufactura real. El proyecto promueve el desarrollo de competencias clave al permitir que los estudiantes interactúen directamente con la arquitectura de la máquina, la programación mediante códigos G y M, el cálculo de parámetros de corte y la elaboración de hojas de proceso, fortaleciendo habilidades en áreas como:

1. Control y automatización de procesos de manufactura.
2. Programación CNC y sistemas embebidos aplicados a máquinas herramienta.
3. Interpretación de planos, tolerancias y control de calidad.
4. Planeación de la producción y optimización de recursos bajo principios de manufactura

avanzada (Lean, JIT, SMED).

Desde el enfoque pedagógico, esta experiencia favorece el aprendizaje activo y significativo, ya que el estudiante asume un rol protagónico en la resolución de problemas reales, desarrollando pensamiento crítico, autonomía técnica y capacidad de análisis frente a restricciones operativas, tiempos, costos y calidad del producto final. Asimismo, la elaboración de informes, bitácoras y reportes técnicos fortalece las competencias comunicativas y documentales propias del profesional en formación. En este sentido, el proyecto se convierte en una plataforma educativa integral que trasciende el simple ejercicio práctico, posicionándose como un entorno de aprendizaje que potencia la formación de capital humano altamente capacitado, especialmente valioso para contextos con limitaciones tecnológicas, donde el acceso a equipos y experiencias reales de manufactura resulta esencial para cerrar brechas de formación y competitividad industrial.

Capítulo 5

Discusión

5.1. Discusión

El proyecto de repotenciación del torno CNC EMCO Compact 5 se convierte en mucho más que una simple actualización técnica: es una intervención estratégica que impulsa la modernización tecnológica y eleva de manera decisiva la calidad del proceso formativo. Desde su origen, se reconoció que este torno aunque aún operativo, arrastraba limitaciones propias de su tecnología inicial, signos evidentes de obsolescencia y un desempeño insuficiente frente a las exigencias actuales de la enseñanza en manufactura CNC.

La repotenciación no solo devolvió al equipo su capacidad operativa, sino que la amplificó, integrando sistemas de control de última generación, electrónica más robusta y una interfaz de programación mucho más intuitiva. El resultado: un entorno alineado con las dinámicas reales de la industria, especialmente valioso en instituciones académicas donde acceder a maquinaria moderna suele ser un desafío por su alto costo. Este tipo de iniciativas se convierte, entonces, en una ruta viable, inteligente y sostenible para avanzar en la actualización tecnológica.

Desde la perspectiva pedagógica, la transformación del EMCO Compact 5 lo eleva a un recurso didáctico activo y profundamente formativo. Los estudiantes no solo operan el torno: entienden su lógica, descifran su arquitectura de control y exploran los principios que gobiernan su funcionamiento. La experiencia con el sistema repotenciado genera un aprendizaje más sólido y significativo, en el que la teoría cobra vida y se enlaza directamente con la práctica. Cada decisión técnica se refleja en la precisión, la repetibilidad y la calidad del mecanizado, creando una comprensión tangible del proceso.

Además, este tipo de intervenciones abre una puerta crucial para llevar tecnología de alto impacto a zonas rurales, donde el acceso a maquinaria de última generación suele ser limitado o inexistente. Proyectos como este demuestran que la modernización no depende únicamente de adquirir equipos nuevos, sino de ingeniar soluciones inteligentes que permitan recuperar, adaptar y potenciar lo que ya existe. Esto facilita la creación de laboratorios rurales más competitivos, impulsa el desarrollo local y brinda oportunidades reales para que estudiantes y comunidades aisladas accedan a tecnología que históricamente ha estado fuera de su alcance.

Este proyecto también fortalece competencias esenciales como el análisis crítico, la resolución de problemas y la toma de decisiones técnicas. Enfrentarse a escenarios reales de diagnóstico, adaptación y puesta a punto del equipo moldea a estudiantes más conscientes, más rigurosos y más preparados para los retos de una industria que exige innovación y optimización constante.

En conjunto, la repotenciación del torno EMCO Compact 5 se consolida como una experiencia que une ingeniería, docencia y tecnología con una coherencia ejemplar. Demuestra que modernizar equipos existentes no solo es una alternativa económica: es una estrategia pedagógica poderosa que potencia la formación de profesionales competentes, críticos y conectados con el pulso real del entorno productivo y tecnológico.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

El proyecto de repotenciación del torno CNC *EMCO Compact 5* demostró que es totalmente viable prolongar la vida útil de equipos académicos mediante la modernización de sus sistemas de control y la actualización de sus componentes electrónicos. Gracias a esta intervención, el torno alcanzó un desempeño más estable, confiable y cercano a las necesidades actuales de la formación en manufactura CNC, optimizando sus capacidades operativas y mejorando su respuesta durante los procesos de mecanizado.

La renovación del sistema de control facilitó una comprensión más profunda por parte de los estudiantes sobre la arquitectura interna del torno, la lógica de programación CNC y la relación directa entre los parámetros de corte y la calidad final de las piezas. Esto permitió transformar el equipo en una herramienta didáctica más accesible, interactiva y coherente con las dinámicas presentes en entornos industriales reales.

Desde el punto de vista técnico, la repotenciación contribuyó a mejorar la repetibilidad del sistema, la precisión dimensional y la eficiencia durante la ejecución de los programas de mecanizado. Estos avances se reflejan en una mayor calidad de las piezas producidas y en resultados más confiables durante las prácticas académicas. Asimismo, se comprobó que esta alternativa es considerablemente más económica que la adquisición de nueva maquinaria CNC, manteniendo un alto nivel de desempeño.

En conjunto, el proyecto se consolidó como una experiencia exitosa que integra mantenimiento, innovación tecnológica y fortalecimiento pedagógico. Los resultados evidencian que modernizar

equipos tradicionales no solo es una estrategia técnica viable, sino también una acción sostenible para potenciar la infraestructura académica y apoyar la formación de ingenieros mecánicos con competencias sólidas en sistemas de manufactura avanzada.

6.2. Recomendaciones

Se recomienda establecer un plan de mantenimiento preventivo y correctivo con una periodicidad definida, de manera que se garantice la estabilidad del sistema repotenciado y se minimice la reincidencia de fallas que puedan comprometer el desempeño del torno o afectar la calidad del proceso formativo. Este plan debe incluir inspecciones programadas, actualización de firmware y verificación del estado de los componentes electrónicos y mecánicos.

Es conveniente complementar la repotenciación con una documentación técnica detallada del sistema actualizado. Esta documentación debe incorporar diagramas eléctricos, manuales de operación y guías didácticas que faciliten la comprensión del funcionamiento del equipo y orienten su correcta manipulación por parte de estudiantes y docentes. Contar con esta información permitirá asegurar un uso adecuado y potenciar el valor pedagógico del torno.

Se sugiere integrar el torno repotenciado dentro de un programa académico estructurado que contemple prácticas progresivas, desde la introducción a la programación CNC hasta actividades avanzadas enfocadas en la optimización de parámetros de corte y la mejora del proceso de mecanizado. Esta secuencia permitirá reforzar el aprendizaje significativo y consolidar competencias técnicas clave en manufactura avanzada.

Finalmente, se recomienda replicar este tipo de iniciativas en otros equipos del laboratorio, promoviendo una cultura de actualización tecnológica sostenible. Esta estrategia favorece la innovación, optimiza el aprovechamiento de los recursos existentes y contribuye al fortalecimiento continuo de las competencias técnicas de los estudiantes.

Bibliografía

- Autodesk (2025a). Autocad. [Software].
- Autodesk (2025b). Autodesk inventor. [Software].
- Autodesk (2025c). Fusion 360. [Software].
- Autodesk (2025d). Fusion 360 cam module. [Software].
- Autodesk (2025e). Powermill. [Software].
- grbl Development Team (2025). grbl: An open source, embedded, high-performance g-code parser cnc milling controller. Consultado el 20 de noviembre de 2025.
- Groover, M. P. (2016). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 6th edition.
- Guo, Y., Li, H., and Chen, Z. (2019). Predictive maintenance strategies for cnc machinery: A data-driven approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 50:34–45.
- Gómez, J. M. and Torres, R. (2019). Diseño e implementación de un sistema cnc con arduino. *Revista de Ingeniería Mecánica*, 12(3):45–59.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., and Baptista, P. L. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill, México, 6 edition.
- Ilari, D., Martins, P., and Costa, L. (2021). Low-cost cnc retrofitting: Modernizing emco compact equipment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(5):1123–1135.
- Intelligence, H. M. (2025). Edgecam. [Software].
- Kaarlela, J. (2024). Machine retrofitting for sustainable manufacturing. *Manufacturing Technology Review*, 18(1):25–39.
- Kuo, B. C. (1997). *Sistemas de control automático*. Prentice Hall, Ciudad (si lo sabes), 7 edition.
- LinuxCNC Project (2025). Linuxcnc: Cnc control software. Consultado el 20 de noviembre de 2025.
- LLC, C. S. (2025). Mastercam. [Software].
- MIT App Inventor Team (2025). Mit app inventor. Consultado el 20 de noviembre de 2025.
- Nassar, A., Kim, S., and López, M. (2022). Open-source cnc controllers for rural workshops. *Automation and Engineering Education*, 8(4):210–225.
- Newfangled Solutions (2025). Mach3 cnc control software. Consultado el 20 de noviembre de 2025.

- OpenBuilds Developers (2025). *OpenBuilds CONTROL & CAM Software*. Suite de software para control y generación de trayectorias CNC.
- OpenBuilds Team (2025). *OpenBuilds Documentation*. Software CONTROL y CAM, documentación técnica y guías para sistemas CNC.
- OpenCNC Project (2025). *OpenCNC Documentation*. Documentación técnica del sistema OpenCNC.
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations*. Free Press, 5th edition.
- Saha, R., Banerjee, T., and Das, P. (2020). Affordable cnc solutions for developing regions. *Journal of Engineering for Sustainable Development*, 15(2):89–102.
- Sarawak Skills (2025). Community-based training models for rural technology adoption. *Rural Engineering Journal*, 9(1):55–70.
- Software, S. D. I. (2025). Siemens nx. [Software].
- Systèmes, D. (2025a). Catia. [Software].
- Systèmes, D. (2025b). Solidworks. [Software].
- Technology, S. (2025). Sprutcam. [Software].
- Zhang, X. and Wang, L. (2021). Maintenance optimization for cnc equipment in resource-limited environments. *Journal of Production Research*, 59(7):1345–1360.
- ZWSOFT (2025). Zw3d. [Software].

Apendice

Práctica Académica: Optimización del proceso de manufactura de la ficha de Parqués

1. Contexto general

Esta práctica se desarrolla en los laboratorios de manufactura de la Institución Universitaria Pascual Bravo, utilizando el torno CNC EMCO Compact 5 repotenciado, junto con otros equipos disponibles.

El uso de este equipo portátil, CNC EMCO Compact 5 repotenciado, favorece significativamente la formación de personal especializado en zonas rurales, ya que permite llevar tecnología avanzada directamente al territorio, reduciendo las brechas entre el entorno rural y el industrial. Esta transferencia tecnológica facilita que jóvenes y técnicos locales adquieran competencias en programación CNC, interpretación de planos, selección de parámetros de corte y control de calidad, fortaleciendo su perfil profesional y ampliando sus oportunidades laborales. Además, promueve el desarrollo de capacidades técnicas sostenibles, impulsa la autonomía productiva de las comunidades y contribuye a la creación de microindustrias con enfoque en manufactura de precisión, generando impacto social, económico y educativo en contextos históricamente limitados en acceso a tecnología.

La pieza a fabricar corresponde a la **ficha de Parqués** según los planos suministrados por el profesor, y el objetivo principal consiste en producir un juego completo de fichas de Parqués en el menor tiempo posible, analizando y optimizando el sistema productivo mediante herramientas de ingeniería y manufactura esbelta.

2. Marco teórico

2.1 Manufactura CNC

La manufactura por Control Numérico Computarizado (CNC) permite automatizar procesos de mecanizado mediante programas previamente diseñados en entornos CAD/CAM, garantizando repetibilidad, precisión y reducción de errores humanos. En el caso del torno CNC EMCO Compact 5, se emplea principalmente para operaciones de torneado cilíndrico, refrentado, ranurado y acabado de piezas simétricas.

2.2 Estrategias de manufactura

- **SMED (Single-Minute Exchange of Dies):** Minimiza tiempos de preparación y cambio de herramientas.
- **Kanban:** Sistema de control visual para regular la producción según demanda.
- **Poka-Yoke:** Dispositivos a prueba de error para evitar defectos.

- **Justo a Tiempo (JIT):** Producción ajustada a la demanda, reduciendo inventarios.
- **Células de manufactura flexible:** Agrupación de máquinas según familias de productos.

3. Estrategia metodológica

La práctica se desarrollará mediante un enfoque aplicado y experimental, siguiendo las siguientes etapas:

1. Análisis del plano de la ficha de Parqués.
2. Definición del proceso CAD/CAM y generación del programa CNC.
3. Medición de tiempos actuales (estado presente).
4. Aplicación de técnicas de mejora continua.

Se empleará cronometraje directo, observación estructurada y uso de fichas técnicas de registro.

4. Estrategia pedagógica

La actividad se fundamenta en el aprendizaje basado en proyectos (ABP) y aprendizaje experiencial, permitiendo que el estudiante:

- Analice un sistema productivo real.
- Tome decisiones de ingeniería.
- Aplique conceptos teóricos en un entorno práctico.
- Trabaje colaborativamente en la optimización del proceso.

Se fomenta la reflexión crítica, el pensamiento sistémico y la toma de decisiones basada en datos.

5. Resultados de aprendizaje

El estudiante será capaz de:

1. Interpretar planos técnicos para procesos de torneado CNC.
2. Estimar y medir tiempos reales de manufactura.
3. Diseñar propuestas de mejora usando herramientas Lean.
4. Justificar una estrategia de manufactura óptima.
5. Comparar escenarios productivos mediante matrices técnicas.

6. Etapas de la actividad

Etapa 1: Ingeniería de manufactura

A partir de la pieza suministrada se deberá determinar:

- Tiempos de generación CAD/CAM
- Tiempo de maquinado por pieza
- Tiempo de montaje
- Tiempo de preparación de material
- Tiempo de desplazamiento
- Estrategia de manufactura seleccionada y justificada

7. Productos a entregar

1. Informe técnico con:
 - Plano de manufactura
 - Hoja de proceso con parámetros de corte
 - Postprocesador (Código G para enviar a la maquina)
 - Resultados del proceso
 - Conclusiones
2. Evidencias fotográficas del proceso.

8. Rúbrica de evaluación

Factor	Excelente (5.0)	Bueno (4.0)	Básico (3.0)	Insuficiente (2.0)	Puntaje
1. Ingeniería del proceso y tiempos (CAD/CAM, maquinado, montaje, preparación y desplazamiento)	Tiempos precisos, bien medidos, justificados y documentados	Tiempos coherentes con leve falta de justificación	Medición incompleta o poco clara	No se evidencian o son incorrectos	30
2. Documentación técnica (Plano, hoja de proceso, parámetros de corte)	Completa, clara y técnicamente correcta	Adecuada con pequeñas fallas	Incompleta o con errores técnicos	No se presenta	25
3. Programación CNC (Código G / postprocesador)	Funcional, validado y correctamente estructurado	Funcional con leves errores	Presenta fallas técnicas	No se entrega	25
4. Resultados y evidencias (Análisis, conclusiones y fotografías)	Resultados claros, análisis técnico y evidencias completas	Análisis general con evidencias parciales	Resultados superficiales	No se presentan	20
Total					100 puntos

9. Forma de entrega

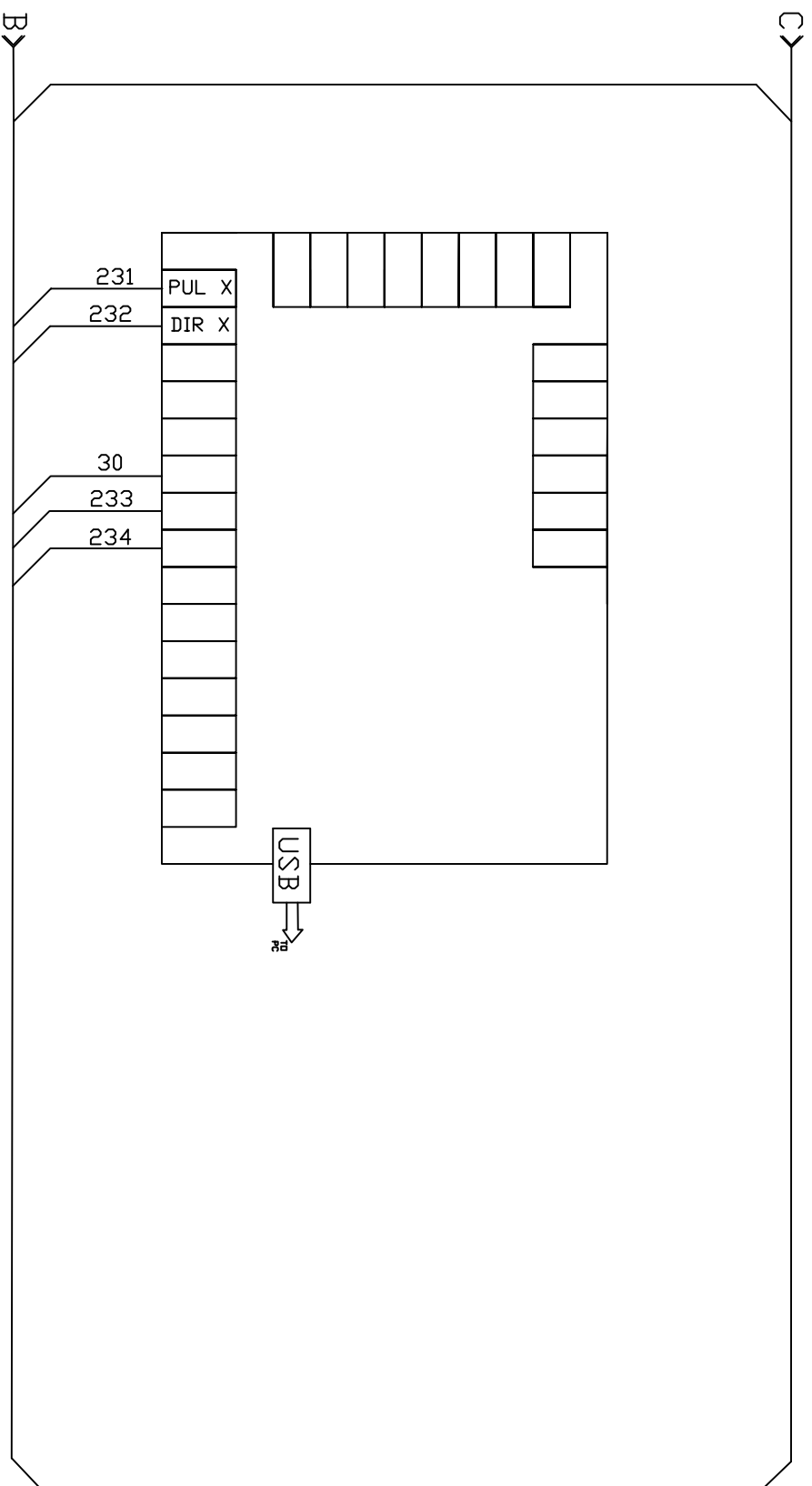
- Informe en PDF, con formato institucional.
- Entrega en plataforma académica classroom.
- Fecha límite:
- Trabajo en grupos de máximo 4 estudiantes.

10. Observaciones finales

Se valorará la coherencia técnica, el dominio conceptual, la rigurosidad en la medición de tiempos y la creatividad en la propuesta de mejora, priorizando soluciones realistas y aplicables al entorno del laboratorio de la Institución Universitaria Pascual Bravo.

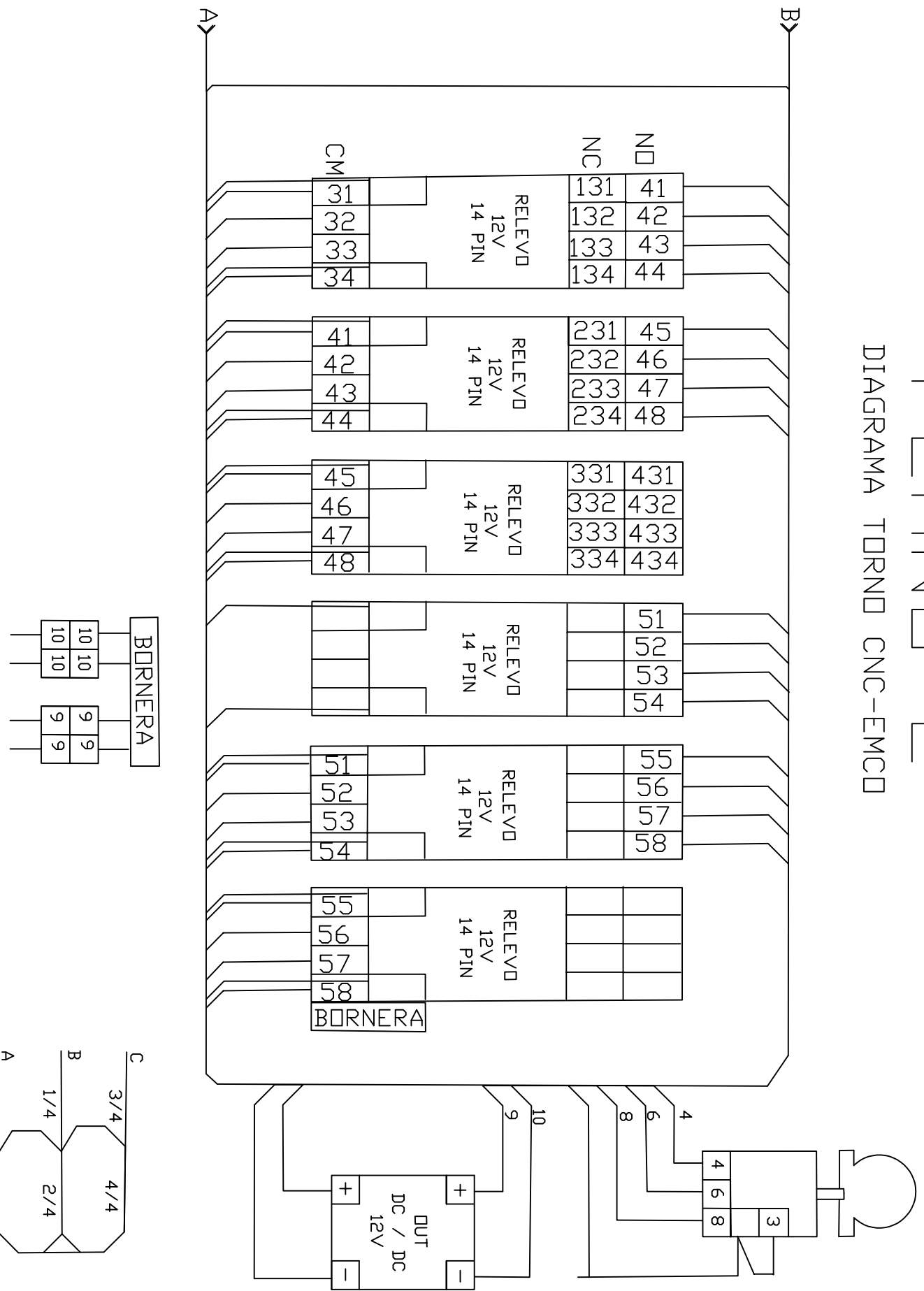
PLANO 3

DIAGRAMA TORNO CNC-EMCO



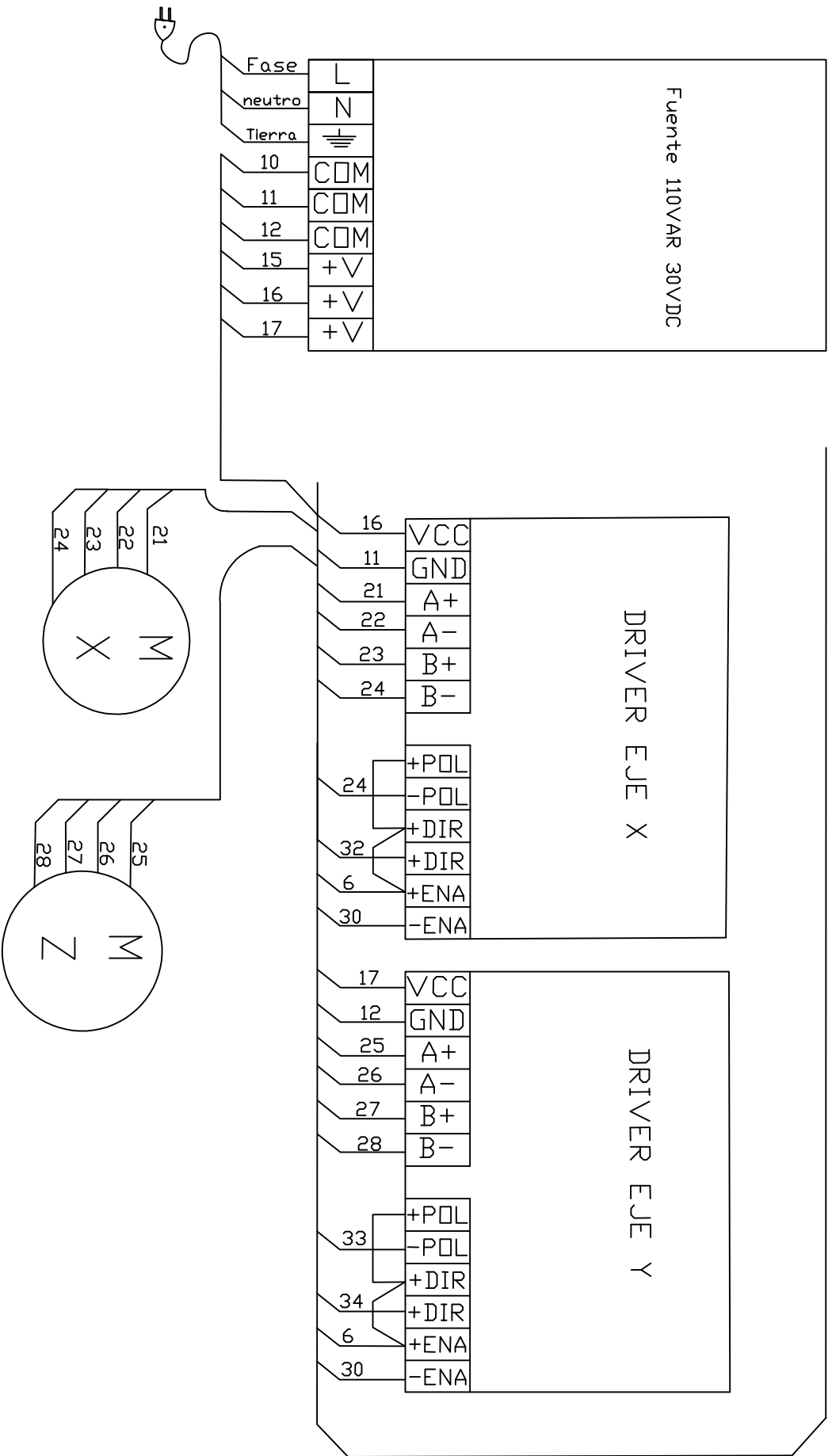
PLANO 2

DIAGRAMA TORNO CNC-EMCO



PLANO 1

DIAGRAMA TORNO CNC-EMCO



%
(INSTITUCION UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO)
(Developed by: XMARTPLM)
(Fecha: 10/27/2025)
(Hora: 12:29:30 PM)
N1 O0001 (Ficha parques)
G18 G21 G40 G80
(Lathe facing 1)
N2 G54
N3T0101 (IC7 Re0.2 R OD cutting tool)
N4 G97 S3000 M03
N5 G00 X23.6 Z2.8
(#KeyPoint: StartCutting)
N6 X19.2
N7 Z0.36
N8 X18.6
N9 Z0.3
N10 G01 Z0. F300.
N11 X-0.48
N12 Z0.06
N13 G00 X18.6
N14 Z-0.2
N15 G01 Z-0.5
N16 X-0.48
N17 Z-0.44
N18 G00 Z2.8
N19 X23.6
(OD Roughing 1)
N20 G97 S3000 M03
N21 X18.6 Z-0.2
(#KeyPoint: StartCutting)
N22 X17.1
N23 G01 Z-37.7
N24 X18.
N25 X18.6 Z-37.4
N26 G00 Z-0.2
N27 X15.6
N28 G01 Z-28.259
N29 X16.2 Z-27.959
N30 G00 Z-0.2
N31 X14.1
N32 G01 Z-23.502
N33 X14.162 Z-23.562
N34 X14.284 Z-23.695
N35 X14.392 Z-23.829
N36 X14.488 Z-23.965
N37 X14.572 Z-24.103
N38 X14.642 Z-24.243
N39 X14.7 Z-24.384
N40 X14.746 Z-24.526

N41 X14.762 Z-24.597
N42 X15.6 Z-28.259
N43 X16.2 Z-27.959
N44 G00 Z-0.2
N45 X12.6
N46 G01 Z-4.861
N47 X13.2 Z-4.561
N48 G00 Z-0.2
N49 X11.1
N50 G01 Z-3.503
N51 X11.21 Z-3.58
N52 X11.428 Z-3.742
N53 X11.636 Z-3.907
N54 X11.834 Z-4.075
N55 X12.022 Z-4.245
N56 X12.2 Z-4.418
N57 X12.368 Z-4.593
N58 X12.526 Z-4.771
N59 X12.6 Z-4.861
N60 X13.2 Z-4.561
N61 G00 Z-0.2
N62 X9.6
N63 G01 Z-2.625
N64 X9.688 Z-2.668
N65 X9.9 Z-2.777
N66 X10.098 Z-2.884
N67 X10.292 Z-2.992
N68 X10.48 Z-3.102
N69 X10.664 Z-3.214
N70 X10.842 Z-3.328
N71 X11.016 Z-3.444
N72 X11.1 Z-3.503
N73 X11.7 Z-3.203
N74 G00 Z-0.2
N75 X8.1
N76 G01 Z-1.988
N77 X8.166 Z-2.012
N78 X8.384 Z-2.094
N79 X8.582 Z-2.173
N80 X8.776 Z-2.251
N81 X8.964 Z-2.332
N82 X9.15 Z-2.413
N83 X9.332 Z-2.497
N84 X9.512 Z-2.582
N85 X9.6 Z-2.625
N86 X10.2 Z-2.325
N87 G00 Z-0.2
N88 X6.6
N89 G01 Z-1.514
N90 X6.814 Z-1.572

N91 X7.184 Z-1.681
N92 X7.556 Z-1.799
N93 X7.922 Z-1.923
N94 X8.1 Z-1.988
N95 X8.7 Z-1.688
N96 G00 Z-0.2
N97 X5.1
N98 G01 Z-1.164
N99 X5.286 Z-1.201
N100 X5.67 Z-1.283
N101 X6.048 Z-1.371
N102 X6.418 Z-1.464
N103 X6.6 Z-1.514
N104 X7.2 Z-1.214
N105 G00 Z-0.2
N106 X3.6
N107 G01 Z-0.919
N108 X3.764 Z-0.941
N109 X4.16 Z-0.999
N110 X4.542 Z-1.061
N111 X4.916 Z-1.128
N112 X5.1 Z-1.164
N113 X5.7 Z-0.864
N114 G00 Z-0.2
N115 X2.1
N116 G01 Z-0.768
N117 X2.314 Z-0.783
N118 X2.676 Z-0.815
N119 X3.046 Z-0.852
N120 X3.416 Z-0.895
N121 X3.6 Z-0.919
N122 X4.2 Z-0.619
N123 G00 Z-0.2
N124 X0.6
N125 G01 Z-0.703
N126 X0.79 Z-0.706
N127 X1.164 Z-0.717
N128 X1.54 Z-0.733
N129 X1.914 Z-0.754
N130 X2.1 Z-0.768
N131 X2.7 Z-0.468
N132 G00 X13.2
N133 Z-4.561
N134 G01 X12.6 Z-4.861
N135 X12.666 Z-4.943
N136 X12.78 Z-5.091
N137 X12.888 Z-5.243
N138 X12.988 Z-5.398
N139 X13.082 Z-5.553
N140 X13.168 Z-5.71

N141 X13.246 Z-5.868
N142 X13.316 Z-6.027
N143 X13.38 Z-6.186
N144 X13.434 Z-6.347
N145 X13.482 Z-6.508
N146 X13.52 Z-6.669
N147 X13.552 Z-6.831
N148 X13.576 Z-6.994
N149 X13.592 Z-7.156
N150 X13.6 Z-7.319
N151 Z-7.482
N152 X13.592 Z-7.645
N153 X13.576 Z-7.807
N154 X13.552 Z-7.969
N155 X13.52 Z-8.131
N156 X13.482 Z-8.293
N157 X13.434 Z-8.454
N158 X13.378 Z-8.615
N159 X13.316 Z-8.774
N160 X13.246 Z-8.933
N161 X13.168 Z-9.091
N162 X13.082 Z-9.248
N163 X12.988 Z-9.404
N164 X12.886 Z-9.559
N165 X12.778 Z-9.712
N166 X12.662 Z-9.864
N167 X12.6 Z-9.94
N168 Z-22.339
N169 X13.728 Z-23.186
N170 X13.794 Z-23.235
N171 X13.882 Z-23.306
N172 X13.972 Z-23.383
N173 X14.06 Z-23.462
N174 X14.1 Z-23.502
N175 X14.7 Z-23.202
N176 G00 Z-9.94
N177 X13.2
N178 G01 X12.6
N179 X12.56 Z-9.988
N180 X12.454 Z-10.112
N181 X12.346 Z-10.23
N182 X12.236 Z-10.346
N183 X12.122 Z-10.46
N184 X12.002 Z-10.573
N185 X11.88 Z-10.685
N186 X11.752 Z-10.796
N187 X11.686 Z-10.851
N188 X11.1 Z-11.338
N189 Z-21.214
N190 X12.6 Z-22.339

N191 X13.2 Z-22.039
N192 G00 Z-11.338
N193 X11.7
N194 G01 X11.1
N195 X9.6 Z-12.587
N196 Z-20.089
N197 X11.1 Z-21.214
N198 X11.7 Z-20.914
N199 G00 Z-12.587
N200 X10.2
N201 G01 X9.6
N202 X8.1 Z-13.835
N203 Z-18.964
N204 X9.6 Z-20.089
N205 X10.2 Z-19.789
N206 G00 Z-13.835
N207 X8.7
N208 G01 X8.1
N209 X6.644 Z-15.047
N210 X6.63 Z-15.107
N211 X6.616 Z-15.183
N212 X6.606 Z-15.267
N213 X6.6 Z-15.352
N214 Z-17.042
N215 X6.608 Z-17.145
N216 X6.622 Z-17.248
N217 X6.646 Z-17.35
N218 X6.676 Z-17.452
N219 X6.712 Z-17.553
N220 X6.758 Z-17.654
N221 X6.81 Z-17.753
N222 X6.87 Z-17.852
N223 X6.936 Z-17.949
N224 X7.01 Z-18.045
N225 X7.092 Z-18.14
N226 X7.18 Z-18.233
N227 X7.274 Z-18.324
N228 X7.374 Z-18.414
N229 X7.482 Z-18.501
N230 X7.54 Z-18.544
N231 X8.1 Z-18.964
N232 X8.7 Z-18.664
N233 G00 X16.2
N234 Z-27.959
N235 G01 X15.6 Z-28.259
N236 X16.214 Z-30.945
N237 X15.6 Z-31.456
N238 Z-34.188
N239 X16.6 Z-34.831
N240 Z-37.7

N241 X17.1
N242 X17.7 Z-37.4
N243 G00 Z-31.456
N244 X16.2
N245 G01 X15.6
N246 X14.1 Z-32.704
N247 Z-33.223
N248 X15.6 Z-34.188
N249 X16.2 Z-33.888
N250 G00 Z-32.704
N251 X14.7
N252 G01 X14.1
N253 X13.82 Z-32.938
N254 Z-32.966
N255 X13.832 Z-33.001
N256 X13.844 Z-33.025
N257 X13.86 Z-33.048
N258 X13.878 Z-33.07
N259 X13.902 Z-33.092
N260 X13.93 Z-33.113
N261 X13.944 Z-33.123
N262 X14.1 Z-33.223
N263 X14.7 Z-32.923
N264 G00 X17.7
N265 Z-0.293
N266 X-1.532
N267 G01 Z-0.351
N268 X-0.234 Z-1.001
N269 X0.024 Z-1.003
N270 X0.44 Z-1.012
N271 X0.872 Z-1.029
N272 X1.306 Z-1.054
N273 X1.74 Z-1.085
N274 X2.172 Z-1.124
N275 X2.602 Z-1.169
N276 X3.028 Z-1.222
N277 X3.45 Z-1.282
N278 X3.868 Z-1.348
N279 X4.284 Z-1.422
N280 X4.692 Z-1.502
N281 X5.096 Z-1.589
N282 X5.494 Z-1.682
N283 X5.886 Z-1.782
N284 X6.27 Z-1.888
N285 X6.648 Z-2.001
N286 X7.018 Z-2.119
N287 X7.38 Z-2.244
N288 X7.734 Z-2.374
N289 X8.078 Z-2.511
N290 X8.414 Z-2.652

N291 X8.74 Z-2.8
N292 X9.056 Z-2.952
N293 X9.364 Z-3.11
N294 X9.658 Z-3.272
N295 X9.944 Z-3.44
N296 X10.218 Z-3.612
N297 X10.48 Z-3.788
N298 X10.732 Z-3.968
N299 X10.97 Z-4.153
N300 X11.196 Z-4.341
N301 X11.41 Z-4.533
N302 X11.612 Z-4.729
N303 X11.8 Z-4.927
N304 X11.976 Z-5.129
N305 X12.138 Z-5.333
N306 X12.286 Z-5.54
N307 X12.422 Z-5.749
N308 X12.542 Z-5.96
N309 X12.65 Z-6.174
N310 X12.742 Z-6.388
N311 X12.822 Z-6.605
N312 X12.886 Z-6.822
N313 X12.936 Z-7.04
N314 X12.972 Z-7.26
N315 X12.994 Z-7.479
N316 X13.002 Z-7.699
N317 X12.994 Z-7.919
N318 X12.972 Z-8.138
N319 X12.938 Z-8.357
N320 X12.886 Z-8.576
N321 X12.822 Z-8.793
N322 X12.744 Z-9.009
N323 X12.65 Z-9.224
N324 X12.544 Z-9.437
N325 X12.422 Z-9.649
N326 X12.288 Z-9.858
N327 X12.14 Z-10.065
N328 X11.978 Z-10.269
N329 X11.802 Z-10.471
N330 X11.614 Z-10.669
N331 X11.412 Z-10.865
N332 X11.198 Z-11.057
N333 X11.086 Z-11.151
N334 X6.044 Z-15.347
N335 X6.03 Z-15.407
N336 X6.016 Z-15.483
N337 X6.006 Z-15.567
N338 X6. Z-15.652
N339 Z-17.342
N340 X6.008 Z-17.445

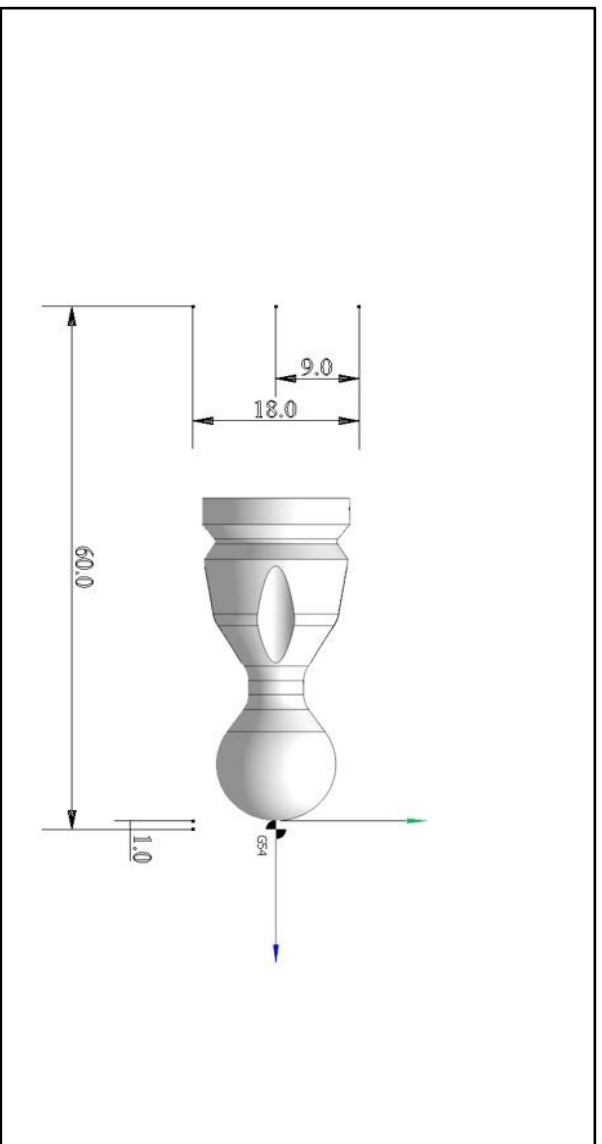
N341 X6.022 Z-17.548
N342 X6.046 Z-17.65
N343 X6.076 Z-17.752
N344 X6.112 Z-17.853
N345 X6.158 Z-17.954
N346 X6.21 Z-18.053
N347 X6.27 Z-18.152
N348 X6.336 Z-18.249
N349 X6.41 Z-18.345
N350 X6.492 Z-18.44
N351 X6.58 Z-18.533
N352 X6.674 Z-18.624
N353 X6.774 Z-18.714
N354 X6.882 Z-18.801
N355 X6.94 Z-18.844
N356 X13.128 Z-23.486
N357 X13.196 Z-23.536
N358 X13.286 Z-23.61
N359 X13.38 Z-23.69
N360 X13.47 Z-23.773
N361 X13.556 Z-23.857
N362 X13.636 Z-23.942
N363 X13.712 Z-24.029
N364 X13.782 Z-24.117
N365 X13.846 Z-24.206
N366 X13.906 Z-24.296
N367 X13.96 Z-24.387
N368 X14.01 Z-24.478
N369 X14.054 Z-24.57
N370 X14.092 Z-24.663
N371 X14.124 Z-24.756
N372 X14.152 Z-24.85
N373 X14.162 Z-24.897
N374 X15.614 Z-31.245
N375 X13.22 Z-33.238
N376 Z-33.266
N377 X13.232 Z-33.301
N378 X13.244 Z-33.325
N379 X13.26 Z-33.348
N380 X13.278 Z-33.37
N381 X13.302 Z-33.392
N382 X13.33 Z-33.413
N383 X13.344 Z-33.423
N384 X16. Z-35.131
N385 Z-38.
N386 X18.
N387 G00 M05

M30

%

HOJA DE PROCESO

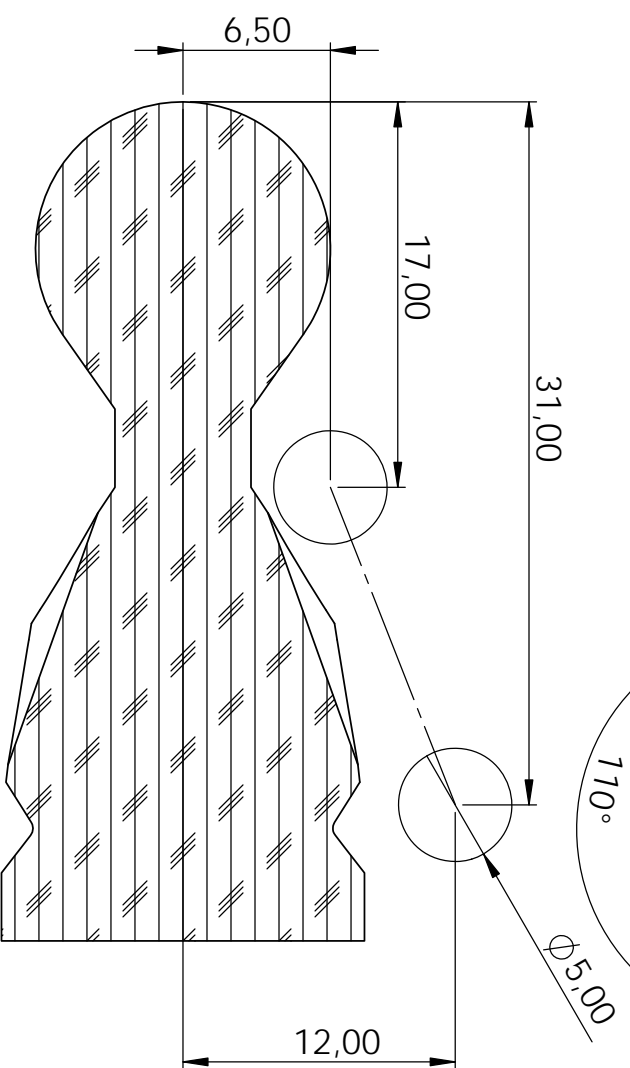
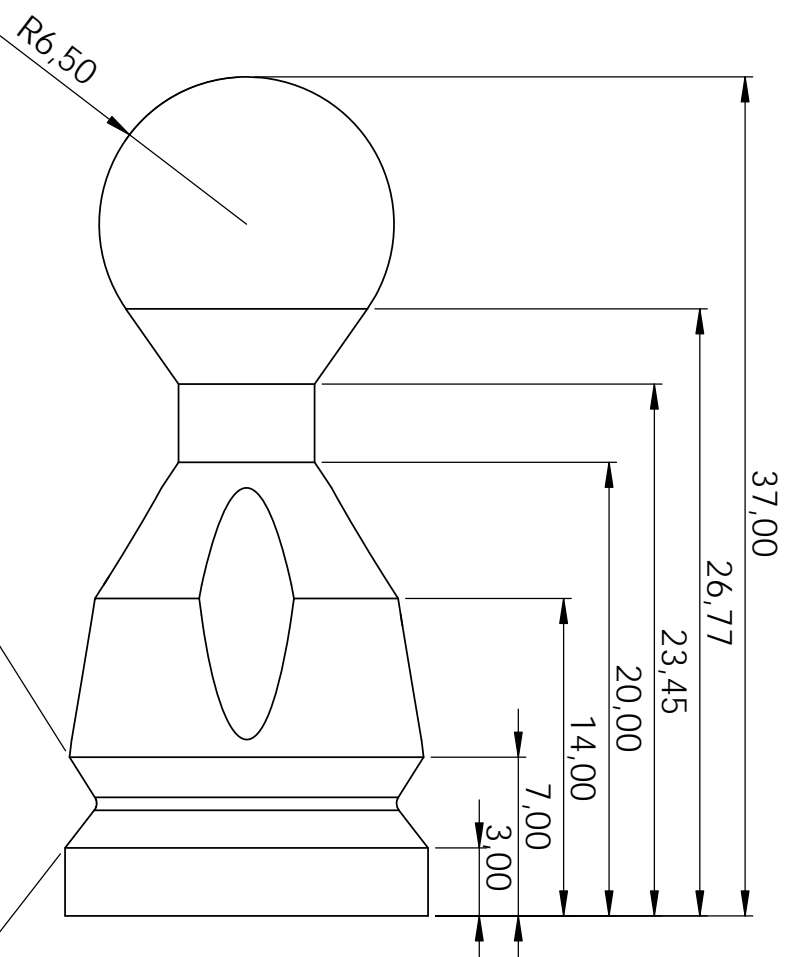
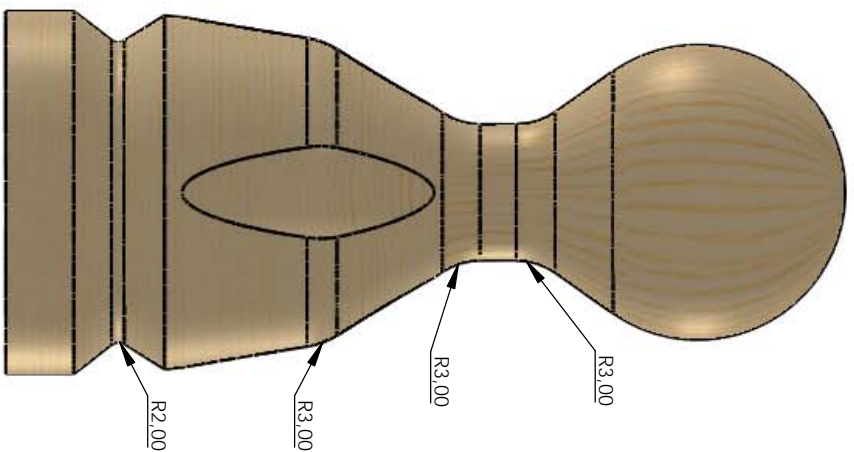
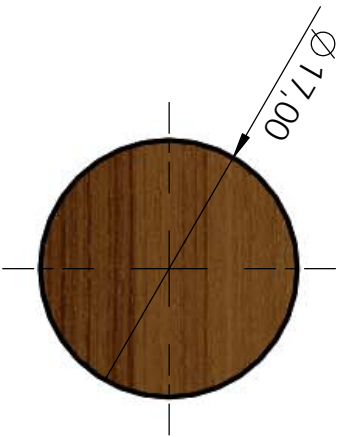
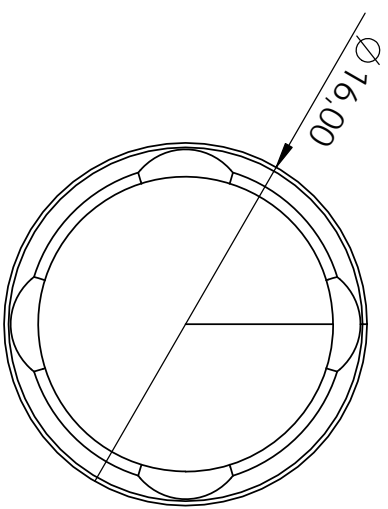
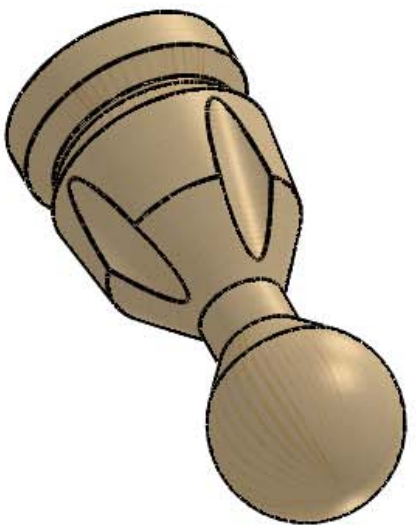
<u>Detalle</u>	Ficha parques
Setup numero	1
NC programa	Ficha parques.nc
Fixtures	



Tiempo de mecanizado (min.) 00:01:04

Desarrollo	Luis E. Cano			
Inspecciono	Julian Mora			
Responsable	R3			

Herramienta N	Tipo de herramienta	diámetro	NC nombre del programa	descripcion de la operación	Nº operación	Tiempo, min	Long. Corte	Zmax	Cortador R	Ang. cono	Num. dientes	F, mm/min.	S, rev/min.
1				Lathe facing 1	1	00:00:14	-					300	3000
1				OD Roughing 1	2	00:00:50	-					300	3000



SECCIÓN A-A

MATERIAL DE TRABAJO

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM/ ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISION
NOMBRE:	FIRMA:	FECHA:	TITULO:	N.º DE DIBUJO: Ficha Parques	
DIBUJ.: LUIS E. CANO				ESCALA: 3:1	
VERIF.: JULIAN MORA					
APROB.: JULIAN MORA					
FABR.: LUIS E. CANO					
CAUD.: JAVIER MEJIA					
MATERIAL: Pino			HOJA 1 DE 1		