

Fabricación de una máquina ruteadora para prestar servicios a las Pymes

Santiago Aldana Parada

Universidad EAN

Proyecto de Grado

Lina María Chacón Rivera

26 de febrero de 2025

Tabla de contenido

Resumen.....	4
Abstract.....	5
Introducción	5
Definición del problema	6
Objetivo general.....	8
Objetivos específicos	8
Justificación	8
Marco de referencia	9
Diseño metodológico	14
Tabla 1	17
Figura 1.	19
Análisis de restricciones	20
Tabla 2	24
Análisis de requerimientos.....	26
Tabla 3	26
Tabla 4	31
Análisis de costos.....	33
Tabla 5	34
Análisis de sostenibilidad	36

Análisis de Resultados	40
Plan de implementación.....	49
Conclusiones	51
Referencias.....	53

Resumen

La Universidad EAN ha fundamentado sus acciones bajo la filosofía de un emprendimiento sostenible, lo que provoca su participación en el laboratorio Fab Lab. Este espacio es uno de los presentes en la red global de laboratorios del MIT. Ofrecen una serie de herramientas de fabricación digital para diseñar y crear objetos físicos. Entre ellos se encuentran las impresoras 3D, cortadoras láser y ruteadoras CNC. Además, el Fab Lab de la universidad EAN busca implementar el propósito de "máquinas que hacen máquinas", fomentando un entorno de aprendizaje accesible, colaborativo y aplicable tanto en contextos educativos como empresariales. El proyecto se centra en el diseño y construcción de fresadoras CNC utilizando materiales no convencionales como PLA que proporcionan la estructura rígida necesaria para la fabricación comercial. Esta iniciativa ayudará a las empresas a investigar, desarrollar y lanzar soluciones innovadoras dentro de un marco sostenible para mejorar el rendimiento.

Palabras clave: Emprendimiento sostenible, ruteadora CNC, Fab Lab, industria.

Abstract

EAN University grounds its actions in the philosophy of sustainable entrepreneurship, which has led to its active participation in the Fab Lab laboratory, part of the MIT global network of fabrication labs. This space provides digital manufacturing tools—such as 3D printers, laser cutters, and CNC routers—to design and create physical objects. The EAN Fab Lab also seeks to advance the principle of “machines that make machines,” promoting an accessible and collaborative learning environment applicable to both educational and industrial contexts. This project focuses on the design and construction of CNC milling machines using unconventional materials, such as PLA, capable of providing the structural rigidity required for commercial manufacturing. The initiative aims to support companies in researching, developing, and launching innovative solutions within a sustainable framework to improve overall performance.

Keywords: Sustainable entrepreneurship; CNC router; Fab Lab; digital fabrication; industry; PLA structure.

Introducción

La fabricación digital ha revolucionado la producción industrial, permitiendo la creación de máquinas de CNC mediante herramientas como impresoras 3D, fresadoras y cortadoras láser. Este enfoque, adoptado por instituciones como la Universidad EAN a través de su Fab Lab, reduce costos, facilita la personalización y enriquece la formación técnica en áreas como diseño, ingeniería y manufactura.

Según Business Research Insights (2025), “el mercado global de máquinas CNC está en crecimiento, con estimaciones que prevén un valor de 1.030 millones de dólares para 2032 y una tasa de aumento anual del 7,66%” (parr. 1). Esto resalta la importancia de adoptar esta tecnología en países como Colombia. En este contexto, la fabricación digital en el Fab Lab permitiría desarrollar una máquina ruteadora CNC accesible, reduciendo costos y garantizando calidad para las pymes.

Previamente, se realizó un diseño con menor dificultad, pero debido a diversos inconvenientes se cuestionó su fiabilidad para el ámbito empresarial. El propósito de la nueva versión es el enfoque industrial que tiene como meta expandir esta tecnología para potenciarla y darle nuevas herramientas a cualquier empresa. Encontrar un equilibrio entre la complejidad del proyecto y su salida al mercado es uno de los retos y aspectos más importantes a considerar.

Este proyecto toma los desafíos de acceso a la tecnología CNC proporcionando máquinas asequibles para renta, mediante la construcción de estas, para alquilar en el Fab lab permitiendo a emprendedores, pequeñas empresas e individuos acceder al diseño y prototipado sin altos costos iniciales. Además, promoverá la innovación y la competitividad mediante la producción sostenible, utilizando materiales como PLA, y ofreciendo soluciones prácticas y rentables para distintos sectores industriales.

Definición del problema

Las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES) desempeñan un papel fundamental en la economía global, impulsando el empleo y la innovación en distintos sectores. La digitalización ha permitido optimizar sus procesos y adaptarse a las exigencias del mercado. Sin embargo, la adopción de estos dispositivos para las PYMES presenta varios problemas en términos tecnológicos, la ventaja relativa, la complejidad y la evaluación. La economía de las pymes de puede definir como:

"Generalmente tienen recursos financieros y no financieros limitados en comparación con las grandes corporaciones. No pueden aprovechar las TIC de manera comparable a las grandes empresas debido a la gran inversión inicial, la mala infraestructura de TI, la falta de recursos humanos y un entorno amigable con la tecnología. Las restricciones financieras de las pymes incluyen la alta inversión inicial y la dificultad para acceder al crédito". (Shahadat et al., 2023, p. 6).

Las PYMEs analizan si una tecnología mejora su eficiencia y competitividad, pero su implementación puede verse afectada si el sistema es demasiado complejo o si sus beneficios no son fácilmente visibles. La inversión en maquinaria requiere infraestructura adecuada y estrategias claras para integrar nuevos procesos.

El presupuesto de una PYME para la adquisición de nueva tecnología varía según su tamaño, sector y ubicación. Algunas estrategias permiten evaluar de forma transparente y clara aspectos de costo, eficiencia y eficacia como describen Kowalski y Nowak (2023) describen como ejemplo de estrategias para facilitar la adopción tecnológica los parques tecnológicos en países como Polonia, donde estos ecosistemas ofrecen acceso a infraestructura avanzada, investigación aplicada y financiamiento para la innovación. La tecnología es esencial para el crecimiento y competitividad de las PYMEs, pero enfrenta desafíos financieros, estructurales y organizacionales. Si bien los parques tecnológicos pueden mitigar algunas barreras, proporcionando infraestructura y análisis financiero, es fundamental desarrollar estrategias que faciliten el acceso equitativo a la tecnología, presentar nuevas alternativas a la misma y otras maneras de adquirirla. Esto permitirá que las PYMEs aprovechen las oportunidades de innovación sin enfrentar limitaciones presupuestarias insostenibles.

Objetivo general

Fabricar una máquina ruteadora CNC con relleno de concreto para trabajar con metales no ferrosos, para ofrecer una solución asequible que permita a emprendedores y pequeñas empresas (PYMES) aumentar su productividad y competitividad mediante la renta de estas máquinas, contribuyendo al desarrollo de la industria local de manera sostenible.

Objetivos específicos

- Desarrollar un prototipo de ruteadora CNC sostenible de bajo costo utilizando herramientas de fabricación digital del Fab lab como impresoras 3D, cortadoras láser.
- Utilizar materiales sostenibles, especialmente PLA, para garantizar la rigidez estructural y sostenibilidad de la máquina.
- Optimizar el diseño de la máquina para equilibrar la complejidad técnica con la accesibilidad y la fiabilidad en entornos empresariales.
- Validar el funcionamiento de la máquina ruteadora mediante una prueba piloto para evaluar su desempeño en la operación normal de producción empresarial.

Justificación

Este proyecto busca democratizar el acceso a la manufactura digital de maquinado de metales no ferrosos mediante la construcción de una máquina ruteadora CNC de bajo costo, con un interior de concreto. Tener la misma capacidad de trabajo en materiales que máquinas de mayor calibre y más costosas.

Para el Fab Lab, este proyecto representa una oportunidad para ampliar su oferta de servicios, fortaleciendo su rol como espacio de aprendizaje y experimentación. Al incorporar una máquina CNC asequible y sostenible, el Fab Lab podrá atraer a más usuarios, diversificar los proyectos desarrollados en sus instalaciones y consolidarse como un referente en innovación y emprendimiento. Además, la propuesta se alinea con la filosofía de "máquinas que crean máquinas", promoviendo un ecosistema donde los propios usuarios puedan mejorar y replicar esta tecnología. . La experiencia adquirida facilitará la integración de estas tecnologías en distintos sectores productivos, promoviendo el desarrollo de soluciones innovadoras accesibles para pequeñas empresas y emprendedores.

Marco de referencia

Maquinas CNC

En la realización de múltiples maquinas máquinas CNC se concluye que su funcionamiento es mediante un sistema automatizado que sigue instrucciones preprogramadas para mover herramientas de corte con precisión. Su operación se basa en la interpretación de un diseño digital creado en un software CAD/CAM, el cual se traduce en comandos que controlan los movimientos de la máquina.

El proceso inicia con la carga del diseño en el software, donde se definen los trayectos y parámetros de corte. Luego, la máquina ejecuta estos comandos a través de motores y actuadores que posicionan la herramienta de corte sobre el material a mecanizar.

Dependiendo del diseño y de la herramienta utilizada, la máquina puede realizar cortes, grabados o perforaciones con alta exactitud y repetibilidad. La integración con software especializado facilita la conversión de diseños digitales en piezas físicas sin intervención manual directa, asegurando eficiencia y calidad en el proceso de manufactura.

La estructura de estas máquinas no varía de forma significativa, ya que su objetivo principal es montar dos o más ejes que proporcionan grados de libertad según los requerimientos específicos. En el punto de operación se instala una herramienta especializada, ya sea un láser, router, extrusor, entre otros, encargada de manipular el material y transformarlo en un diseño modelado por el usuario. Por esta razón, el acabado y la fabricación de estas máquinas presentan grandes diferencias y son capaces de realizar una amplia variedad de tareas, lo que ha vuelto su uso esencial en múltiples procesos industriales y productivos.

Transformación de las PYMEs

La adopción de maquinaria avanzada en las pymes colombianas responde a la necesidad de mejorar su competitividad en un mercado cada vez más digitalizado. La integración de máquinas CNC, robótica y sistemas de automatización les permite optimizar procesos, reducir errores y aumentar la eficiencia operativa. Estas tecnologías no solo mejoran la

precisión en la manufactura, sino que también facilitan la producción flexible y personalizada, adaptándose a las demandas del mercado. Además, el mantenimiento predictivo basado en sensores IoT y análisis de datos ayuda a minimizar tiempos de inactividad y costos operativos. Aunque la inversión inicial puede ser un desafío, la implementación progresiva de estas herramientas permite a las pymes modernizarse sin comprometer su estabilidad financiera. Según Empresite Colombia (2024), una plataforma que agrupa información empresarial; existe 123 empresas en el país que tienen relación con el término "CNC" en sus actividades. Estas empresas están distribuidas en 17 departamentos. La automatización y el rendimiento de una máquina CNC son factores tan fuertes y remarcados de estas máquinas que las empresas industriales se ven obligadas cada vez más a asumir esta tecnología o contar con un tercero que la tenga, en Colombia la cantidad de empresas CNC es tan baja que ralentiza el trabajo de varios sectores lo cual termina perjudicando al consumidor.

Normas de ingeniería

Normativas aplicables a la fabricación de ruteadoras CNC

El diseño y fabricación de una máquina ruteadora CNC debe cumplir con diversas normativas técnicas para garantizar precisión, seguridad y eficiencia en su operación. Estas normas establecen los requisitos en términos de tolerancias dimensionales, seguridad en los sistemas de control y calidad de los materiales empleados en su construcción.

3.2 Tolerancias y precisión en máquinas CNC

Para asegurar la exactitud en los procesos de mecanizado, se aplican normas como la ISO 2768, que define tolerancias generales en piezas mecánicas, y la ISO 13041, que establece los requisitos de precisión geométrica y de posicionamiento en máquinas CNC (ISO, 2001, 2005). Estas normativas permiten evaluar la calidad del mecanizado y reducir desviaciones dimensionales que puedan afectar la producción.

3.3 Seguridad en la operación de máquinas CNC

El diseño de ruteadoras CNC debe considerar normativas de seguridad como la ISO 23125, que establece lineamientos para la protección del operario y la correcta implementación de dispositivos de seguridad en máquinas herramienta (ISO, 2015). Además, la ISO 12100 y la ISO 13849 regulan la seguridad en los sistemas de control eléctricos y electrónicos, asegurando que el software y hardware empleados en el control numérico cumplan con estándares de fiabilidad y prevención de fallos (ISO, 2010, 2019).

3.4 Normas eléctricas y de automatización

La IEC 60204-1 es una referencia clave en la seguridad eléctrica de máquinas industriales, estableciendo los requerimientos de cableado, protecciones y conexiones eléctricas en sistemas CNC (IEC, 2016). Asimismo, la IEC 61800 regula la eficiencia energética en sistemas de automatización y control de motores eléctricos empleados en ruteadoras CNC (IEC, 2015).

3.5 Materiales y estándares de fabricación

Para garantizar la resistencia estructural de la ruteadora CNC, se aplican normas de materiales como la ASTM A36, que especifica estándares para acero estructural, y la ASTM

6061-T6, que regula el uso del aluminio en la fabricación de componentes mecánicos (ASTM, 2014, 2018). Estas normativas aseguran que los materiales seleccionados tengan la resistencia y durabilidad adecuadas para soportar las fuerzas de corte y vibraciones generadas durante el mecanizado.

3.6 Gestión de calidad y sostenibilidad

El cumplimiento de la ISO 9001 garantiza la aplicación de un sistema de gestión de calidad en el proceso de fabricación, optimizando la eficiencia en la producción de la máquina ruteadora CNC (ISO, 2015). Además, la ISO 14001 establece directrices para minimizar el impacto ambiental de los procesos de manufactura, promoviendo prácticas sostenibles en la industria de maquinaria (ISO, 2015).

1. Marco Contextual

Las pequeñas y medianas empresas (PYMEs) enfrentan numerosos desafíos al intentar adoptar tecnologías digitales en sus procesos productivos. La falta de recursos financieros y la escasez de personal especializado en tecnología son dos de las principales barreras que limitan su capacidad para modernizarse. Sin embargo, la digitalización se ha convertido en un factor determinante para la competitividad y sostenibilidad de los negocios en un mercado cada vez más globalizado y orientado a la automatización.

A pesar de la importancia de la digitalización, un porcentaje significativo de empresas sigue rezagado en este proceso. “la variación con respecto a la media es del 75.71%. De

ello se obtiene que 39.49% de las empresas tienen una digitalización baja, 23.58% digitalización media y 36.94% digitalización alta. En promedio, el nivel de digitalización de los negocios encuestados se encuentra en 0.31” (Loyola et al., 2024. p. 11)

Estos resultados reflejan que, a pesar del creciente reconocimiento de la importancia de la digitalización, una parte significativa de las empresas aún no ha logrado integrar herramientas tecnológicas en sus operaciones. La falta de inversión en infraestructura digital y la resistencia al cambio organizacional pueden ser factores clave que dificultan la transición. Superar estas barreras no solo permitiría a las PYMEs optimizar sus procesos internos, sino también aprovechar oportunidades como la implementación de máquinas ruteadoras CNC, las cuales pueden mejorar la precisión y eficiencia en la fabricación de productos, reduciendo costos y tiempos de producción.

Diseño metodológico

El siguiente cronograma presenta la planificación general para el desarrollo de una máquina CNC ruteadora, diseñada bajo criterios de sostenibilidad, funcionalidad y bajo costo. El proyecto no fue concebido únicamente como una propuesta técnica individual, sino como una solución práctica que responde a las necesidades del entorno productivo y académico, aprovechando al máximo las herramientas del Fab Lab de la Universidad EAN.

A lo largo de esta planificación se reflejan las prioridades establecidas desde la etapa inicial del proyecto, entre ellas la investigación sobre el tipo de máquina más adecuada, los requisitos estructurales necesarios para reducir vibraciones, la capacidad de corte de materiales como el metal, y la viabilidad de construcción mediante impresión 3D y el uso de componentes económicos. Estas decisiones se tomaron con base en las capacidades disponibles, los objetivos de sostenibilidad y los estándares técnicos identificados en el análisis previo.

El objetivo del cronograma es organizar y distribuir de forma eficiente el tiempo disponible hasta la fecha de entrega final, el 4 de junio de 2025. Todas las actividades están asignadas a un único responsable, quien lidera tanto el diseño como la ejecución técnica, con el acompañamiento de los docentes asignados al proyecto y el respaldo logístico del Fab Lab. La ejecución se apoya en la infraestructura del Fab Lab, donde se llevarán a cabo las fases clave, como la impresión, el ensamblaje y las pruebas.

1.1. Fases del proyecto

Fase 1: Planeación y diseño

- Buscar qué máquina se va a realizar
- Selección de requerimientos
- Diseño en SolidWorks
- Lista de materiales
- Compras en Amazon

Fase 2: Preparación de la estructura

- Impresión 3D de componentes de la carcasa
- Corte de platinas
- Programación de componentes

Fase 3: Conformado con cemento

- Ensamble de la carcasa
- Vertido del concreto
- Secado del concreto
- Impresión de las camas de los ejes

Fase 4: Ensamble mecánico y electrónico

- Montaje de soportes de platinas
- Instalación de varillas y motores
- Ensamble de las camas de los ejes
- Integración electrónica

Fase 5: Pruebas de funcionamiento

- Verificación de conexiones
- Pruebas de movilidad
- Evaluación de esfuerzos

Fase 6: Validación final y presentación

- Ensayos
- Validación final

- Presentación del proyecto

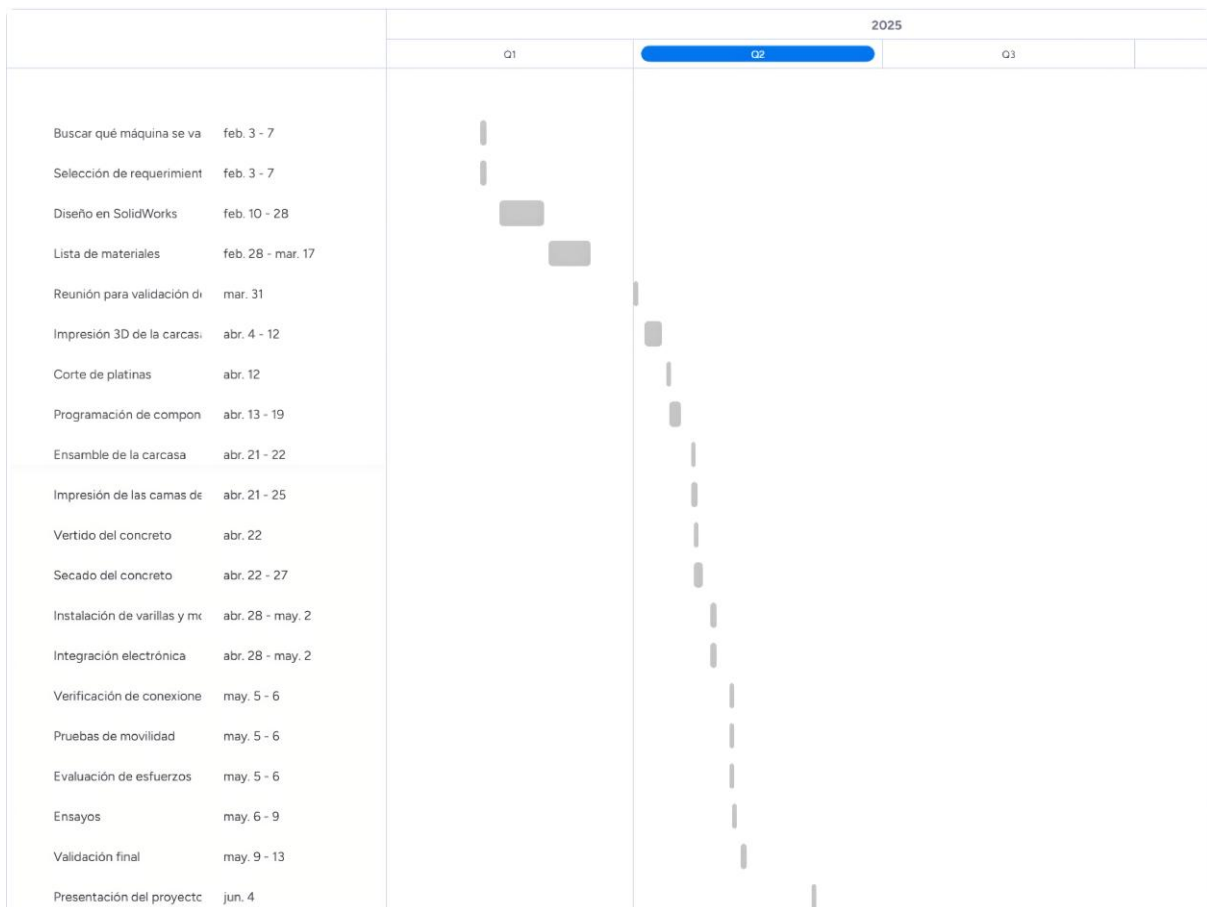
Tabla 1

Cronograma de actividades

Fase	Actividad	Fecha de inicio	Fecha de fin	Observaciones
1	Buscar qué máquina se va a realizar	3 de febrero	9 de febrero	Investigación en documentos y videos
	Selección de requerimientos	3 de febrero	9 de febrero	Paralelo a la búsqueda
	Diseño en SolidWorks	10 de febrero	28 de febrero	Modelado completo del sistema
	Lista de materiales	28 de marzo	17 de marzo	Entregada para gestión de compra
	Reunión para validación de compras	31 de marzo	31 de marzo	Revisión con el comité de compras
2	Impresión 3D de la carcasa	4 de abril	12 de abril	Impresiones en curso
	Corte de platinas	12 de abril	12 de abril	Corte inicial planificado
	Programación de componentes	14 de abril	20 de abril	Planeado para Semana Santa
3	Ensamble de la carcasa	21 de abril	22 de abril	Dependerá del avance de impresión
	Vertido del concreto	22 de abril	22 de abril	Fecha tentativa
	Secado del concreto	22 de abril	27 de mayo	Fecha estimada, depende de humedad y clima
	Impresión de las camas de los ejes y platinas	21 de abril	25 de abril	Inicia tras secado del concreto
4	Instalación de varillas y motores y	Abril 28	2 de mayo	Montaje mecánico

	componentes no programables			
	Integración electrónica	Abril 28	2 de mayo	Cableado, drivers, y pruebas de firmware
5	Verificación de conexiones	5 de mayo	6 de mayo	Chequeo de circuitos y pines
	Pruebas de movilidad	5 de mayo	6 de mayo	Evaluación de desplazamientos
	Evaluación de esfuerzos	5 de mayo	6 de mayo	Validación de torque y fijación
6	Ensayos	6 de mayo	9 de mayo	Pruebas funcionales generales
	Validación final	9 de mayo	13 de mayo	Preparación de defensa
	Presentación del proyecto	4 de junio	4 de junio	Entrega y sustentación final

Figura 1. Diagrama de Gantt del proyecto CNC ruteadora.



Nota: Diagrama de Gantt del proyecto CNC ruteadora. Elaborado con Monday.com por el autor.

1.3 Consideraciones especiales

- Se proyecta un margen de contingencia de 2 semanas y media para absorber retrasos en la impresión 3D, secado de concreto o integración de componentes.
- Aunque las actividades están programadas de forma secuencial, existe la posibilidad de realizar ajustes y validaciones en paralelo según el progreso.
- En caso de no lograr finalizar el proyecto a escala completa, se tiene previsto un plan de emergencia que consiste en presentar una maqueta a menor escala

que conserve la lógica estructural y de funcionamiento de la máquina propuesta.

Análisis de restricciones

1. Objetivo

- Fabricar una máquina CNC para las pymes de Bogotá, utilizando una técnica de relleno de concreto.

2. Factores limitantes

- **Físicas:**

- **Tamaño:** 525 mm x 430 mm x 480 mm.
- **Peso:** Aún desconocido, pero se prevé un peso considerable debido al concreto.
- **Forma:** Imagen de la máquina (aún por definir en términos de diseño visual).
- **Espacio de trabajo:** X = 228 mm, Y = 195 mm, Z = 93 mm (debe acomodar piezas de trabajo de pymes).

- **Materiales:**

- Aluminio, latón, cobre, plástico, acrílico, madera, espuma.

- **Técnicas:**

- **Componentes eléctricos y electrónicos:**
 - Motor NEMA 23.
 - Controlador TB6600.
 - Regulador de 110V.
 - Fuente de 24V.
 - ESP32-WROOM-32 (microcontrolador).
 - Motor de husillo.
 - Módulo Buck LM2596.
 - Amplificador operacional NE5532.

- **Proceso de manufactura:** Uso de técnica de relleno de concreto para estabilizar la estructura de la máquina.

- **Económicas:**
 - **Financiamiento:** 4.6 millones de pesos colombianos provenientes del seminario de investigación de la Universidad EAN.

 - **Consideraciones:** El presupuesto debe ajustarse para cubrir todos los costos de fabricación, incluidos materiales, componentes electrónicos y costos de mano de obra.

- **Temporales:**
 - **Fecha límite:** 4 de junio.

- **Normativas:**

- **Requisitos de seguridad:**

La máquina CNC debe cumplir con las normativas locales de seguridad para maquinaria industrial, específicamente la NTC 2070 (ICONTEC, 2008), que establece las condiciones mínimas de seguridad para el diseño, construcción y operación de máquinas en Colombia. Además, se recomienda tener en cuenta principios internacionales de seguridad como los establecidos en la ISO 12100 (International Organization for Standardization, 2010), relacionados con la evaluación y reducción de riesgos.

- **Normas de electricidad:**

Todos los sistemas eléctricos de la máquina deben ser diseñados conforme a la NTC 2050 (ICONTEC, 2017), que regula las instalaciones eléctricas en Colombia, asegurando una operación segura y eficiente. También se sugiere seguir los lineamientos de la norma internacional IEC 60204-1 (International Electrotechnical Commission, 2016) para la seguridad eléctrica de maquinaria industrial.

Normativas de emisiones y sostenibilidad:

Inicialmente, el proyecto contemplaba el uso de concreto verde para la estructura de la máquina CNC, en busca de reducir la huella de carbono y cumplir con los principios de sostenibilidad establecidos por la *ISO 14001* (International Organization for Standardization, 2015). Sin embargo, debido a limitaciones en los proveedores, se optó por utilizar cemento convencional. A pesar de este cambio, el compromiso ambiental del proyecto se mantiene, buscando en futuras etapas incorporar prácticas de construcción sostenible y materiales de menor impacto ambiental cuando sea posible.

- **Operativas:**

La máquina debe ser funcional de forma permanente y no desmontable una vez que el concreto se haya fraguado, lo que limita la flexibilidad en el mantenimiento y transporte de la máquina.

- **Ambientales:**

- **Sostenibilidad:** Reducción de las emisiones de carbono mediante el uso de concreto verde en la construcción de la estructura.

- **Impacto en el entorno de trabajo:** La máquina debe ser adecuada para trabajar en entornos de pymes, considerando condiciones como la temperatura, humedad y el nivel de ruido.

Tabla 2

Restricciones de fabricación

Restricción	Tipo	Grado de Flexibilidad	Impacto
Dimensiones de la máquina	Física	Flexible	Alta
Peso de la máquina (aún desconocido)	Física	Moderado	Alta
Forma de la máquina	Física	Flexible	Media
Espacio de trabajo	Física	Inamovible	Alta

Materiales usados	Materiales	Moderado	Alta
Capacidad de corte	Materiales	Moderado	Media
Motores NEMA 23	Técnica / Operativa	Inamovible	Alta
Controlador TB6600, fuente de 24V, ESP32, etc.	Técnica / Operativa	Flexible	Alta
No desmotable	Física / Operativa	Inamovible	Alta
Costo de fabricación	Económica	Inamovible	Alta
Fecha límite	Temporal	Inamovible	Alta
Normativas de seguridad y eléctricas	Normativa	Inamovible	Alta

Alternativas de diseño y construcción

En tal caso de presentar algún imprevisto en el desarrollo de la maquina se cuenta con tres configuraciones, cada una es un avance en un punto importante de los objetivos del diseño. En el primer nivel se espera obtener todo el apartado mecánico y estructural del proyecto, si bien no llegase a funcionar o no del todo, aun, se podría tener una maqueta muy elaborada y un amplio rango de mejorar. En el nivel dos se obtiene un prototipo capaz de mover y simular cortes pero que no tiene la capacidad de realizar algún trabajo debido a que no tiene el relleno de concreto, pero lo solamente se podrá evidenciar el diseño del nivel uno y su funcionamiento. Por último, en el nivel 3 tendrá un relleno de concreto y además de moverse podrá cortar diversos materiales y funcionar como una maquina operaria real.

Análisis de requerimientos

Tabla 3

Análisis de requerimientos para la funcionalidad de la máquina

Especificaciones	Requerimientos funcionales	Diseño	Operación	Partes interesadas
Calidad de piezas (Capacidad)	Vibraciones Fuerza Torque	Corriente Voltaje	Materiales Distintos Circuitos	Sala general → Herbert Perico (Dueño universidad EAN) FabLab EAN
Características finales del producto	Resistencia Mantenimiento Software	Refrigeración Precisión Tamaño Velocidad Material Fijación		

Nota: Fuente Elaborado en clase (2025)

Para que una máquina CNC sea válida en un entorno de producción, debe cumplir con requerimientos técnicos que aseguren la exactitud dimensional, la repetibilidad del proceso y la conformidad con las especificaciones del diseño. Estos sistemas son programados para ejecutar trayectorias y operaciones complejas con mínima intervención humana. La influencia de CNC se observa principalmente en la categoría de diseño y operación, ya que impacta en la precisión, velocidad y fijación de las piezas, además de optimizar la utilización de distintos materiales para la construcción.

El cemento, como material de referencia, se analiza en función de su resistencia y estabilidad. En el diseño, la influencia del cemento se relaciona con la necesidad de peso y capacidad de sopotar altos esfuerzos, especialmente en procesos donde los materiales requieren de mayor potencia para manipularlos.

La importancia del PLA (Ácido Poli láctico) radica en la compatibilidad con la manufactura digital, permitiendo la producción de piezas con geometrías complejas y su compatibilidad para distintas funciones. En la tabla se vincula con la categoría de diferentes materiales dentro de la operación, ya que su aplicación puede sustituir elementos más costosos o difíciles de manufacturar con otros métodos.

Especificaciones de la Máquina CNC

El desempeño de una ruteadora CNC depende de una programación precisa, una calibración adecuada y la selección correcta de herramientas y materiales, esto garantiza la calidad y exactitud en la fabricación de piezas. A continuación, se presentan las especificaciones técnicas de una máquina CNC diseñada para mecanizar diversos materiales con alta precisión y estabilidad. Se detallan sus dimensiones, los materiales que puede procesar, su precisión y sistema de movimiento, la resistencia a vibraciones, el sistema de anclaje, las velocidades esperadas, la estructura y masa, el diseño de la cama y los componentes adicionales que la conforman. A continuación, se desarrollan todos estos aspectos en detalle.

Dimensiones de trabajo:

- Eje X: 195 mm
- Eje Y: 228 mm
- Eje Z: 95 mm

Dimensiones de la máquina:

- Largo (X): 452 mm

- Ancho (Y): 410 mm
- Alto (Z): 463 mm

Materiales procesables:

- **Maderas:** MDF, triplay (contrachapado), madera maciza (pino, nogal, roble, etc.), bambú.
- **Plásticos:** Acrílico, PVC, nylon, polietileno (HDPE).
- **Metales blandos:** Aluminio (si la máquina es robusta y se usa lubricación/neblina), latón y cobre (con pasadas muy ligeras).

Precisión y movimiento:

- Utiliza motores paso a paso de 200 pasos por vuelta con un tornillo rocado de 10 mm de diámetro y paso de 2 mm.
- **Resolución del movimiento:** 0.01 mm por paso.

Resistencia a vibraciones:

Se requiere un estudio sobre la resistencia a las vibraciones del cemento para evaluar su aplicación en la estructura.

Sistema de anclaje del material:

Anclaje mediante tornillos planos y platinas.

Velocidad y aceleración:

- Se busca una velocidad superior al prototipo anterior (350 mm/min en desplazamiento y 200 mm/min en corte).

- No se esperan modificaciones significativas en la aceleración para evitar deslizamientos y pérdida de precisión.

Masa y estructura:

- **Masa esperada:** igual o superior a 15 kg.
- Refuerzos en el cabezal del eje X sin necesidad de relleno de concreto, evitando un aumento excesivo de masa.

Diseño de la cama:

Base de platina de aluminio con una capa de madera para protección de la cama y la platina.

Componentes adicionales:

- Dos cajones para componentes electrónicos, conectados por un espacio estrecho en el frente del soporte del eje Y.
- Tres finales de carrera para el control del punto de origen de la máquina.

Lista de componentes

Desde el sistema de transmisión y movimiento hasta el control de velocidad y alimentación, la correcta selección e integración de estos elementos determina el desempeño final del equipo. Cada componente cumple una función específica dentro del proceso de mecanizado, asegurando que la máquina opere con precisión, estabilidad y eficiencia. Un adecuado ensamblaje y alineación de los sistemas mecánicos, junto con una correcta configuración de los elementos electrónicos, son factores clave para optimizar el rendimiento y prolongar la vida útil de la ruteadora CNC.

A continuación, se presenta una lista de los principales componentes utilizados en la fabricación de una ruteadora CNC, los cuales permitirán garantizar un mecanizado preciso y eficiente.

Tabla 4

Lista de materiales

Nombre	Cantidad	Notas
Filamento PLA	2	Kilogramo
Cemento de uso general - Argos	1	Cemento Gris
Varilla de Motor de paso con husillo	3	T10 * 300 mm
Varilla de Acero	6	Exactamente de 10 mm
Acople de motor	3	10 mm y 8 mm diámetro interior y 19 exterior
Rodamientos lineales	10	10 mm diámetro interior, 19 mm diámetro exterior y 29 mm de largo
Rodamientos	3	10 mm diámetro interior, 26 mm diámetro exterior y 8 mm de largo
Tabla MDF	2	5mm * 150 mm * 220 mm
Enchufe macho de clavijas	1	
Insertos Calefactados	13	M4*6 mm*6 mm
Tornillos para insertos calefactados	13	M4*6mm
Tubo PVC	2	42 mm diámetro * 1 metro
Kit de motor de Paso	1	Nema23, controladore TB6600, placa de control de movimiento CNC, fuente de 24 V

Varilla roscada de ferretería	4	3/8 * 1 metro
Tuercas de varilla roscada	30	3/8 tuerca
Cable multifaria de cobre	1	16 AWG / 4 conductor / 25 fts
Final de carrera	3	1 por cada eje
Kit de motor de Husillo	1	Motor brushed o sin escobillas, 500W Mach 3 power supply, abrazadera de 52 mm, pieza me mandril para CNC, fresa Cable
Tornillos y tuercas # 6-32	44	20 de longitud 30 mm, 16 de 55mm de longitud y 4 de grosor 1/8 in de 55mm de longitud, 4 largos de 70mm de longitud
Platinas	2	6 mm de grosor

Para la sujeción del material, se utilizará una tabla con orificios circulares, la cual estará fijada a una platina de metal previamente ruteada con espacios para atornillar la tabla. Esta estructura se unirá a la cama del eje Y, asegurando que la tabla absorba los daños de la fresa y sea fácilmente reemplazable.

En este prototipo, se emplearán los mismos programas que en la versión inicial: *Candle* para la ejecución de código G y *FluidNC* para la configuración de los parámetros en el microcontrolador. La fuerza y el torque depende directamente de la configuración de los motores y su integración con los drivers, el motor paso a paso *23HS8430B* proporciona un torque de hasta 270 oz-in (180N.cm/39.7 lbs-cm), permitiendo movimientos precisos sin riesgo de pérdida de pasos o sobrecalentamiento.

Análisis de costos

Con el propósito de evaluar la viabilidad económica del proyecto de diseño y construcción de una máquina CNC router orientada a pequeñas y medianas empresas (PYMEs) en Colombia, se desarrolló un análisis financiero. Este análisis considera los costos iniciales de inversión, las proyecciones operativas, el flujo de caja estimado y los principales indicadores financieros, con el objetivo de determinar si el proyecto es rentable, escalable y sostenible en el tiempo.

La inversión total requerida para poner en marcha el proyecto es de \$61.743.379 COP, distribuida en dos componentes esenciales: \$43.678.855 COP en activos fijos, destinados a la adquisición de servicios de maquinaria, mobiliario, software y otros recursos necesarios tanto tangibles como intangibles para garantizar un año completo de operación; y \$18.064.524 COP como capital de trabajo, destinados a cubrir dos meses iniciales de funcionamiento, incluyendo gastos operativos y un margen de contingencia. La financiación se estructura con un aporte de \$25.000.000 COP por parte de los emprendedores y un crédito por \$36.743.379 COP, el cual podrá ser amortizado en dos años mediante cuotas anuales progresivas hasta \$26.097.634 COP, con una tasa de interés del 18% anual. Alternativamente, parte de esta inversión podría cubrirse con un porcentaje de los beneficios generados por la producción.

El costo unitario de fabricación de cada máquina CNC es de \$3.010.754 COP, e incluye materiales, componentes electrónicos, procesos como impresión 3D, tornillería, motores y personal de ensamblaje. Con un precio de venta sin IVA de \$4.094.625 COP, se obtiene un margen de contribución unitario de \$1.083.871 COP. El análisis financiero muestra que el aumento en la producción tiene un efecto más significativo sobre la

rentabilidad que un incremento en el precio de venta, ya que permite distribuir los costos fijos entre más unidades. Por ello, se proyecta una expansión progresiva en los primeros cinco años, comenzando con la venta de 36 unidades en el primer año, manteniendo precios estables y generando un crecimiento constante gracias al aprovechamiento de las economías de escala.

El análisis financiero del proyecto arrojó indicadores clave que confirman su rentabilidad y atractivo para la inversión. La Tasa Interna de Retorno (TIR) se sitúa en un sólido 43,31%, muy por encima del costo de oportunidad del capital. Además, el periodo de recuperación se estima en 3,87 años, lo que significa que la inversión se recupera antes del cuarto año. A cinco años, se proyecta una utilidad acumulada de \$162.273.000 COP, consolidando la viabilidad económica del proyecto y su capacidad para generar ingresos sostenidos.

Tabla 5

Utilidad neta

Año	Ventas totales (COP)	Utilidad neta (COP)
2025	\$147.406.500	\$8,048,712
2026	\$168.308.742	\$10,589,771
2027	\$211.059.162	\$17,498,300
2028	\$272.266.319	\$26,199,218
2029	\$367.396.171	\$37,834,117

Nota: Resultado calculado con el simulador financiero de la universidad EAN

Por otro lado, el análisis del punto de equilibrio muestra que el nivel mínimo de ventas necesario para cubrir los costos fijos es accesible. Con un margen de contribución unitario de \$1.083.871 COP y costos fijos anuales de \$2.800.000 COP, se estima que el punto de equilibrio se alcanza con la venta de aproximadamente 2,58 máquinas, lo que equivale a

ingresos por \$10.577.781 COP (sin IVA). En otras palabras, con la venta de apenas tres máquinas, el proyecto comienza a generar utilidades, lo que indica un riesgo financiero bajo en las etapas iniciales de operación.

El flujo de caja libre del proyecto refleja generados después de cubrir todos los costos operativos, financieros, fiscales y de inversión. Las proyecciones muestran resultados positivos en todos los años operativos, iniciando con \$22.522.801 COP en 2025 y aumentando hasta alcanzar \$42.212.354 COP en 2029. En conclusión, el proyecto de diseño y producción de una máquina CNC router demuestra una alta viabilidad económica. Los indicadores financieros son sólidos, el retorno de la inversión se estima en menos de cuatro años, y el modelo de negocio presenta márgenes atractivos junto a un flujo de caja positivo de forma sostenida. Al enfocarse en PYMEs colombianas —un segmento históricamente marginado de la manufactura avanzada—, no solo ofrece una solución tecnológica asequible, sino que también genera un impacto social significativo. Además, su escalabilidad con inversiones adicionales razonables refuerza su posición como un emprendimiento competitivo dentro del mercado de fabricación digital.

Análisis de sostenibilidad

Este análisis investiga los aspectos ambientales más importantes asociados al diseño, fabricación y funcionamiento del prototipo, si bien el enfoque principal del proyecto es técnico-funcional, desde su etapa de prototipado también se han tenido en cuenta criterios básicos de sostenibilidad, especialmente en relación con los materiales empleados y el consumo energético. A diferencia de equipos convencionales fabricados completamente en metal, este prototipo propone un cambio estructural importante: reemplazar gran parte del esqueleto metálico por concreto convencional, combinado con una carcasa externa de PLA impreso en 3D.

Materiales

En primer lugar, el núcleo de la máquina está conformado por una estructura sólida de cemento gris convencional (marca Argos), que actúa como soporte principal. Esta elección implica ventajas en términos de rigidez y amortiguación de vibraciones, pero también plantea problemas ambientales, especialmente debido a la alta huella de carbono del cemento. Aunque se exploró el uso de eco-cemento como alternativa con menor impacto ambiental, su implementación no fue posible en esta versión por falta de disponibilidad en los proveedores de la universidad. No obstante, su inclusión se proyecta como una mejora viable a mediano plazo.

En segundo lugar, la carcasa impresa en PLA cumple una doble función: molde para el vaciado del cemento y protección del mismo. Se sabe que el PLA es un bioplástico derivado de fuentes renovables, pero en su reutilización se debe tomar en cuenta la separación de la parte de concreto con la carcasa para poder reutilizarla o investigar las

nuevas propiedades de vibración, peso y estabilidad del hormigón reciclado con PLA, y evaluar si su comportamiento es mejor o igual al de una mezcla convencional de concreto. La estructura se complementa con varillas metálicas, platinas de aluminio, tornillos, rodamientos, motores y componentes electrónicos. Algunos elementos fueron recuperados del primer intento, evidenciando prácticas incipientes de reutilización, aunque no sistematizadas.

Desechos

Durante la fabricación del prototipo se generaron diversos residuos, entre ellos:

- Carretes vacíos de filamento PLA.
- Bolsas de cemento.
- Embalajes de componentes electrónicos.
- Polvo metálico y restos de aluminio.

Una parte de estos residuos puede ser reciclada (cartón, aluminio, carretes), pero otros no cuentan con rutas de aprovechamiento claras. Es necesario trazar nuevas rutas de reciclaje o manejo de residuos, además de las ya existentes. A pesar de que la estructura no es desmontable tras el fraguado del concreto, muchos de sus componentes mecánicos y electrónicos sí pueden ser recuperados o actualizados sin necesidad de desechar el equipo completo.

Impacto ecológico

Sintetizando toda la información y las problemáticas vistas en la contaminación generada, se concluyeron cuatro puntos importantes. Se entiende que existen más aspectos ecológicos por revisar, pero en este momento se identifican cambios posibles sin comprometer el desarrollo del proyecto:

- Sustituir el cemento gris convencional por eco-cemento.
- Reutilizar materiales como varillas, tornillos y platinas de otros equipos que aún sean viables para la fabricación de nuevos productos.
- Rediseñar componentes para facilitar desmontaje, reparación o sustitución.
- Evaluar modos de eficiencia energética en el control del sistema.

Impacto social

En penúltimo lugar desde una perspectiva social, el proyecto tiene un valor educativo y formativo importante. Se ha desarrollado en un entorno universitario con participación en espacios como el FabLab, fomentando el aprendizaje sobre microcontroladores, diseño mecánico y fabricación digital. El modelo propuesto es replicable a nivel local, utilizando materiales de fácil acceso en Colombia. Aunque aún no se ha trabajado directamente con pymes, el prototipo se proyecta como base para futuras versiones funcionales o talleres de transferencia tecnológica.

Consumo energético

Por último la máquina utiliza tres motores paso a paso con controladores TB6600, cada uno operando con una fuente a 24 V y con una corriente nominal de 3 A debido a los motores. Además, incorpora un motor de husillo con una potencia nominal de 500W. La potencia teórica total del sistema puede calcularse con la fórmula convencional de vatio de la siguiente manera:

Motores paso a paso:

Potencia por motor: $P = V \times I = 24 \text{ V} \times 3 \text{ A} = 72 \text{ W}$

Potencia total motores: $72 \text{ W} \times 3 = 216 \text{ W}$

Motor de husillo (dada por el manual): 500 W

Potencia total estimada: $216 \text{ W} + 500 \text{ W} = 716 \text{ W}$

Esto implica que, en condiciones de operación continua a plena carga, el sistema consumiría aproximadamente 0.716 kWh por hora. Sin embargo, este valor representa un máximo teórico. En la práctica, el consumo energético varía debido a:

- Control por modulación de ancho de pulso (PWM) de los controladores TB6600, que ajustan la corriente según la carga, motores mas o menos potentes consumen más o menos energía.
- Periodos de inactividad o desplazamientos sin carga, si el diseño es complejo y dura largos periodo de tiempo requerirá de más energía.
- Configuración de micropasos y aceleración.

En conjunto, estos datos permiten tener una visión preliminar del impacto energético del equipo. No se han implementado aún estrategias como apagado automático o eficiencia por software, pero podrían incorporarse para reducir el consumo durante tiempos inactivos. Este dispositivo representa un primer paso hacia el desarrollo de soluciones accesibles con potencial sostenible. Aunque aún hay áreas por mejorar, el proyecto demuestra que es posible integrar principios de sostenibilidad desde el diseño estructural y la selección de materiales, incluso en entornos con recursos limitados. La experiencia ha permitido comprender mejor la relación entre diseño, funcionalidad y responsabilidad ambiental, sentando bases sólidas para

versiones futuras con menor huella ecológica y mayor impacto positivo en el entorno productivo.

Análisis de Resultados

El presente capítulo recopila y analiza de forma detallada los principales datos obtenidos durante el desarrollo del primer y segundo prototipo estructural, los cuales combinan componentes impresos en PLA con una base sólida de concreto. A partir de esta experiencia práctica, se ha consolidado un registro técnico con tiempos, pesos y cantidades exactas de materiales empleados, seguido de una descripción minuciosa de los eventos ocurridos durante el proceso de vertido del concreto, ensamblaje estructural y las múltiples dificultades técnicas que surgieron en el camino.

Este análisis permite no solo identificar errores y dificultades, sino también reflexionar sobre los aprendizajes derivados, los ajustes implementados en el segundo intento y los hallazgos inesperados que podrían representar mejoras estructurales o funcionales en futuras iteraciones del proyecto.

Síntesis de materiales y recursos utilizados

Impresión en PLA

Tiempo total de impresión: 101.034 horas \approx 101 h 2 min

Peso total de PLA utilizado: 3769 g = 3.769 kg

Base de cemento y elementos estructurales

Metálicos y varios

34 tuercas

12 pedazos de varillas (equivalente a 2 metros, 1.2 kg)

16 tornillos y tuercas

11 insertos M4 con tornillos

2 pedazos de tubos PVC

16 tubos de PLA con tornillos y tuercas

Mezcla de concreto

- 18.5 tazas de arena (10.3 kg)
- 9.25 tazas de cemento (4.6 kg)
- 7.5 tazas de agua (2.6 kg)
- Peso aproximado total del concreto (no se toma en cuenta el peso de los motores, varilla de los ejes, platinas de aluminio fuentes de alimentación y controladores): 22.6 kg

Elementos de forrado y sellado

1 papel vinipel

1 cinta ancha transparente

1 cinta de enmascarar

1 tubo de superbonder

3 barras de silicona

Desarrollo del prototipo: dificultades, soluciones y mejoras

Mezcla y vertido de concreto

Inicialmente se pensó que preparar toda la mezcla de concreto desde el principio podría provocar que las últimas porciones se endurecieran antes de ser vertidas, por lo que se optó por preparar pequeñas cantidades (4 a 6 tazas de arena). Aunque esta decisión aseguraba una mezcla más fresca, generó tres problemas importantes:

- **Herramientas limitadas:** Solo se disponía de dos tazas, una dedicada exclusivamente al agua. Esto causaba contaminación cruzada entre las bolsas de los materiales de arena y cemento.
- **Demoras operativas:** Las pausas constantes para preparar nuevas mezclas extendieron el tiempo del vertido. Las primeras porciones empezaban a fraguar prematuramente.
- **Irregularidad en la mezcla:** La falta de control y precisión debido al poco tiempo que se tenía y a las demoras constantes afectaron en el conteo de tazas durante las interrupciones y generó una mezcla inconsistente.

Causas del fracaso del primer intento

El primer intento de fabricación presentó fallos estructurales y funcionales que comprometieron seriamente la integridad del prototipo. A continuación, se detallan las principales causas:

1. Vibración excesiva del sistema

Se adaptó una lijadora oscilante como vibrador externo con el objetivo de mejorar el asentamiento del concreto. Sin embargo, su uso provocó efectos negativos significativos:

- **Daño a la herramienta:** El concreto filtrado deterioró el mecanismo interno de la lijadora, destruyendo el caucho protector y afectando su funcionamiento.
- **Rupturas de PLA:** El diseño no estaba preparado para absorber o disipar las fuerzas de tal magnitud.

2. Fallos en el diseño de las columnas y acoples

El sistema requería que el concreto fluyera desde las columnas hacia una sección con forma de “T”. Para facilitar el proceso, las columnas se dividieron en secciones unidas por acoples impresos en PLA. Estos componentes resultaron ser un punto de falla por diversas razones:

- **Dirección de impresión inadecuada:** Las piezas eran resistentes a tracción perpendicular a las capas, pero muy frágiles cuando las fuerzas se alineaban con el plano de impresión.
- **Fuerzas de montaje desfavorables:** El ensamblaje a presión inducía esfuerzos en la dirección más débil de las piezas, lo que llevó a rupturas durante el vertido y la vibración del concreto por partición.
- **Imposibilidad de reparación:** Una vez fracturado un acople, no era posible reemplazarlo sin destruir otras partes del molde, lo que significaba la pérdida total del trabajo.

3. Consecuencias prácticas de las fallas

Las rupturas generaron efectos colaterales graves:

- En un caso, una fisura importante se detectó **una hora y media después del vertido**, impidiendo la correcta unión entre el concreto viejo y el nuevo.

Mejoras y observaciones del segundo intento

El segundo intento incorporó una serie de ajustes técnicos con el objetivo de reducir errores críticos del primer prototipo. A continuación, se describen las mejoras aplicadas, sus efectos y los nuevos problemas detectados.

1. Optimización de la mezcla de concreto

Reducción de ciclos de mezcla: Solo se prepararon dos mezclas principales, aunque una fue más densa y otra más líquida al igual ayudo a optimizar el proceso, disminuyó el tiempo de trabajo y aun así redujo irregularidades en la consistencia del concreto. Las propiedades el concreto pueden cambiar con respecto a las proporcione de las mezclas si bien hay dos diferencias en la consistencia existe la posibilidad de que en cada apartado las diferencias de la mezcla sean de hecho una ventaja. La mezcla más sólida se concentró en la base, mientras que la líquida ascendió por las columnas. Este comportamiento podría implicar un beneficio estructural: mayor rigidez en la base y mejor absorción de vibraciones en la parte superior. Sin embargo, esta hipótesis requiere una validación.

Ajustes estructurales: Se agregó un hueco en el centro de la estructura para permitir el vertido directo en la parte inferior, reduciendo por mucho el recorrido del concreto. No obstante, una vez lleno este orificio facilitó filtraciones en los vertidos de las columnas columnas, que se corrigieron provisionalmente con una “tapa” de MDF.

Mejoras en los acoples: Se redujo el tamaño de los acoples a la mitad y se utilizó superbonder para su unión debido a que fue una solución viable que se realizó en el primer intento y resulto factible para una de las columnas. Aunque se logró una mejor fijación, persistieron problemas.

Los dos acoples se rompieron durante el ensamblaje. Uno no presento mayores complicaciones de reparación mientras que el otro generó una leve inclinación por la generación en un lado de una capa de superpoder en seco. La inclinación fue de alrededor de un grado generando un desplazamiento de la parte superior de 2mm. El problema se resolvió usando una arandela impresa y se pudo alinear las varillas de los ejes si tantos problemas, pero quedó en evidencia la necesidad de rediseñar completamente este sistema de unión.

Sustitución del sistema de vibración: Se reemplazó la lijadora por un masajeador muscular inalámbrico, obteniendo varios beneficios:

- Más fácil de manejar.
- Menor riesgo de daño por filtraciones, ya que fue factible proteger la herramienta con vinipel.
- En vez de una forma cuadrada afilada en las esquinas, el masajeador tenía una bola semiblanda, gracias a esto no se generó ningún corte en el PLA y filtración de concreto por causa de la herramienta.
- Sin embargo, presentó una limitación importante: su batería se agotó en el último proceso de la máquina y si bien no faltaba mucho para terminar al igual significo pausas de entre 5 a 10 min en lo que cargaba el dispositivo.

Observaciones y fallos detectados

a. Fisuras en PLA

Se observaron nuevas fisuras en el segundo intento a los dos días de secado, especialmente en las columnas. Se sospecha que el concreto más líquido transmitió mayor presión o tracción al PLA, debilitándolo.

b. Problemas de impresión 3D

- Variaciones en tolerancias entre diferentes impresoras afectaron la precisión de los ensambles.
- La falta de mantenimiento en una de ellas generó atascos y pérdidas de material. Algunas piezas no se adherían correctamente a la cama de impresión, desprendiéndolas o levantándolas, arruinando por completo la impresión.

c. Corte de varillas

El corte de varillas estructurales tomó entre 3 y 7 minutos, mientras que las varillas para ejes requerían entre 10 y 15 minutos. Este tiempo fue similar en ambos intentos.

d. Fijación de la electrónica

- Las cajas para componentes eléctricos presentaban un diseño ineficiente, debido a que el mecanismo para unirlos a la base de concreto terminó ocupando demasiado espacio con las tuercas.
- Se evidenció la necesidad de usar cables multifibra para evitar fallos por ruptura de cables monohilo debido a flexiones repetidas.

e. Reutilización de componentes

- El fallo del primer intento permitió identificar formas de recuperar piezas útiles, como varillas y tuercas.

El desarrollo y análisis de los dos primeros prototipos híbridos de PLA y concreto han dado una serie de desafíos técnicos, errores de diseño y dificultades operativas. Sin embargo, también han brindado aprendizajes valiosos que sientan las bases para futuras mejoras. La combinación de materiales con comportamientos mecánicos tan diferentes—como el PLA y el concreto—ha requerido múltiples adaptaciones improvisadas, desde la dosificación manual del concreto hasta la sustitución del sistema de vibración. Estos cambios, aunque solucionaron problemas específicos, dejaron claro que ciertos aspectos del diseño y del proceso necesitan ser reconsiderados a fondo.

Entre los hallazgos más importantes se destaca la sensibilidad del PLA ante fuerzas mal distribuidas, la complejidad de mantener una mezcla uniforme en condiciones de trabajo no estandarizadas, y la necesidad de contar con herramientas más adecuadas para la manipulación y vibración del concreto. Las fisuras detectadas en etapas avanzadas, las fallas en los acoples impresos y los errores de impresión también subrayaron la importancia de controlar mejor la calidad en cada fase de fabricación.

A pesar de las limitaciones, el segundo intento mostró mejoras significativas, como la reducción de los tiempos de vertido, una distribución más estratégica de las mezclas según su consistencia, y una menor afectación del sistema de vibración sobre la estructura. No obstante, los problemas estructurales persisten, y ha quedado claro que algunas soluciones implementadas, como el uso de acoples de PLA, deben ser reemplazadas por diseños más

robustos y técnicamente viables. Finalmente, este proyecto no solo ha permitido avanzar en la construcción del prototipo, sino que también ha generado un registro detallado de materiales, tiempos, errores y soluciones que será clave para futuras iteraciones.

Plan de implementación

Para introducir máquinas CNC en pequeñas y medianas empresas, es necesario seguir un plan que considere desde el análisis del entorno hasta su despliegue y mejora continua. Todo comienza con una evaluación de viabilidad técnica y del contexto local. Se debe identificar qué pymes pueden beneficiarse de esta tecnología, como carpinterías, talleres de mecanizado o emprendimientos de diseño. Este análisis no se limita al tipo de empresa, sino también a su infraestructura: se deben revisar condiciones como el acceso eléctrico, el espacio disponible, la ventilación y la presencia de polvo o humedad, que podrían afectar el rendimiento de la máquina. Asimismo, es clave detectar las necesidades reales de estas empresas a través de encuestas o entrevistas, para conocer los materiales que trabajan, los procesos que usan actualmente y los desafíos que enfrentan.

Una vez comprendido el entorno, se puede avanzar hacia la fabricación y optimización del prototipo. En la oferta laboral tiene un componente de capacitación técnica. Se ofrecería entrenamiento básico en el uso del software necesario para operar la máquina, como Candle o FluidNC, y en tareas de mantenimiento preventivo, con el fin de que los empleados puedan trabajar con autonomía y sin depender constantemente de soporte externo.

En cuanto al modelo de negocio, se plantea la venta directa, especialmente a través de Fab Labs o centros de innovación locales. Esto facilitaría el acceso a la tecnología sin una gran inversión inicial. Además, se contemplaría un sistema de soporte técnico presencial o remoto para resolver fallas simples que puedan afectar la efectividad del sistema. Dado que el diseño no es completamente modular, la actualización por partes solo es viable de forma parcial pudiendo cambiar las varillas, ejes y componentes electrónicos, pero no la estructura de cemento.

El despliegue de esta tecnología seguiría una estrategia por fases. La primera etapa consistiría en un piloto controlado, implementando el sistema en tres a cinco pymes seleccionadas y acompañadas por personal técnico. A partir de esta experiencia se recogerían datos sobre errores, buenas prácticas y mejoras necesarias, lo que permitiría ajustar tanto el diseño como el modelo de implementación. Finalmente, si los resultados son positivos, se procedería a un escalamiento mayor, ya sea mediante producción en serie dentro de Fab Labs o a través de alianzas con talleres locales.

La última parte del plan se centra en la evaluación y mejora continua. Se utilizarán indicadores clave como la cantidad de horas de operación sin fallas, la precisión alcanzada, el ahorro económico en los procesos productivos y la satisfacción de los usuarios. Con base en estos resultados, se actualizará el diseño incluyendo mejoras en los acoples, la resistencia a la vibración o la selección de materiales. A futuro, se contempla el uso de eco-cemento y la creación de protocolos para la reutilización de piezas metálicas y electrónicas, alineando el proyecto con principios de sostenibilidad.

Conclusiones

La experiencia acumulada durante la construcción y prueba de los prototipos ha permitido confirmar la viabilidad técnica del proyecto. A pesar de los errores surgidos como fisuras en la estructura, problemas de vibración o roturas en las uniones, el segundo prototipo demostró que es posible construir una máquina CNC funcional utilizando concreto como base estructural y PLA como carcasa. Esta combinación representa una alternativa de bajo costo sin sacrificar de forma significativa la rigidez, lo que la convierte en una solución prometedora para contextos donde los recursos son limitados.

Una de las aportaciones más innovadoras del proyecto fue precisamente el uso de materiales no convencionales. El PLA, comúnmente utilizado en impresión 3D, sirvió no solo como carcasa protectora sino también como molde para verter el concreto, lo que simplificó la fabricación sin necesidad de herramientas industriales avanzadas. Esta estrategia demuestra cómo es posible adaptar tecnologías existentes para dar respuesta a necesidades locales mediante enfoques creativos.

Sin embargo, también quedó en evidencia una debilidad crítica: las uniones entre los componentes. Las piezas impresas presentaron fallos estructurales debido a uniones mal diseñadas y problemas en tolerancias, lo que sugiere la necesidad urgente de rediseñar las zonas que no cumplieron con la expectativa inicial. Más allá del resultado técnico, el proyecto tuvo un impacto social y formativo significativo. El desarrollo dentro de un Fab Lab permitió la discusión de ideas y un constante aprendizaje de estudiantes, trabajadores y algunos terceros.

Finalmente, aunque en esta etapa inicial se utilizó cemento convencional, se dejó clara la intención de transitar hacia materiales más sostenibles, como el eco-cemento. También se prevé la reutilización de piezas electrónicas y estructurales, así como la mejora de la eficiencia energética del sistema. Estas acciones se alinean con una visión a largo plazo centrada en la sostenibilidad ambiental y la economía circular. En conjunto, estas conclusiones no solo validan la propuesta inicial, sino que ofrecen una hoja de ruta clara para su mejora continua y eventual escalamiento a nivel local o regional.

Referencias

Kowalski, J., & Nowak, A. (2023). The Role of Business Incubators and Technology Parks in Supporting Startups in Poland: A Netnographic Study. *Journal of Entrepreneurship and Innovation*, 15(2), 45-67.

Czaplińska, A., & Romanowski, R. (2024). Functioning of business incubators and technology parks in Poland in the context of Industry 4.0. *Poznań University of Economics and Business*.

Business Research Insights. (2025). *Desktop CNC Machines Market Size, Growth | Forecast 2032*. Business Research Insights.
<https://www.businessresearchinsights.com/es/market-reports/desktop-cnc-machines-market-102832>

ASTM. (2014). ASTM A36/A36M-14: Standard Specification for Carbon Structural Steel. ASTM International.

ASTM. (2018). ASTM B221-18: Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Extruded Bars, Rods, Wire, Profiles, and Tubes. ASTM International.

IEC. (2015). IEC 61800-9-2: Adjustable speed electrical power drive systems - Part 9-2: Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics & their driven applications. International Electrotechnical Commission.

IEC. (2016). IEC 60204-1: Safety of machinery – Electrical equipment of machines – Part 1: General requirements. International Electrotechnical Commission.

ISO. (2001). ISO 2768-1: General tolerances – Part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications. International Organization for Standardization.

ISO. (2005). ISO 13041-1: Test conditions for numerically controlled turning machines and turning centres - Part 1: Geometric tests for machines with horizontal work spindles. International Organization for Standardization.

ISO. (2010). ISO 12100: Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction. International Organization for Standardization.

ISO. (2015). ISO 9001: Quality management systems – Requirements. International Organization for Standardization.

ISO. (2015). ISO 14001: Environmental management systems – Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization.

ISO. (2019). ISO 13849-1: Safety of machinery – Safety-related parts of control systems – Part 1: General principles for design. International Organization for Standardization.

Loyola, D. M., Pesántez, S. E., Jimbo, L. P., Naula, F. B., Campoverde, J. A. B., & Romero, C. A. (2024). Medición de la digitalización de MiPyME's de la ciudad de Azogues, Ecuador: Influencia en su reactivación económica. *Revista Espacios*, 45(03), Art. 12.

<https://revistaespacios.com/a24v45n03/a24v45n03p12.pdf>

Monday.com. (s.f.). *Gestión de proyectos y cronogramas online*. <https://monday.com/>

Chowdhury, E. K., & Mavrotas, G. (2020). COVID-19 and SME failures: Evidence from selected Asian economies. SSRN.

https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3712627

Rolong-Ibáñez, J., Sierra-Márquez, S., Tapias-Higuera, E., Coba-Salcedo, M., Yime-Rodríguez, E., & Roldán-Mckinley, J. (2019). Controlador CNC para modernización del proceso de fresado a bajo costo: Caso con fresadora Supernova. *Revista UIS Ingenierías*, 18(3), 95-103. <https://www.redalyc.org/journal/5537/553762534011/>

RATTMMOTOR. (s.f.). *Kit de motor paso a paso de controlador CNC de 4 ejes, Nema23 Motor paso a paso 270oz-in 3A eje dual 23HS8430B, controlador de motor paso a paso TB6600, Placa de control de movimiento CNC*. Amazon.

Zambrano García, C. (2022). Análisis de materiales, diseño y componentes para mejorar una ruteadora CNC de alto rendimiento. *Revista de Innovación Tecnológica*, 25(4), 75-89.

Empresite Colombia. (2024). Informe sobre la adopción de tecnología CNC en la industria electrónica. Empresite Colombia. Recuperado de:

<https://empresite.eleconomistaamerica.co/Actividad/CNC/>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2008). NTC 2070: Condiciones de seguridad para máquinas y equipos industriales. ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2017). NTC 2050: Código Eléctrico Colombiano. ICONTEC.

International Organization for Standardization. (2010). ISO 12100: Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction. ISO.

International Electrotechnical Commission. (2016). IEC 60204-1: Safety of machinery – Electrical equipment of machines – Part 1: General requirements. IEC.

International Organization for Standardization. (2015). ISO 14001: Environmental management systems – Requirements with guidance for use. ISO.