UNIVERSIDAD INDOAMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TEMA:

DISEÑO CINEMÁTICO DE UNA MANDRINADORA DE SEIS EJES

Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del título de Ingeniero Industrial

Autor:

Marco Andrés Bolaños Cordero

Tutor:

Ing. Pablo Elicio Ron Valenzuela MSc.

QUITO/ ECUADOR

2026

AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL AUTOR PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TRABAJO DE TÍTULACIÓN

Yo, Marco Andrés Bolaños Cordero, declaro ser autor del Trabajo de Titulación con el nombre **"DISEÑO CINEMÁTICO DE UNA MANDRINADORA DE SEIS EJES",** como requisito para optar al grado de Ingeniería Industrial y autorizo al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica Indoamérica, para que con fines netamente académicos divulgue esta obra a través del Repositorio Digital Institucional (RDI-UTI).

Los usuarios del RDI-UTI podrán consultar el contenido de este trabajo en las redes de información del país y del exterior, con las cuales la Universidad tenga convenios. La Universidad Tecnológica Indoamérica no se hace responsable por el plagio o copia del contenido parcial o total de este trabajo.

Del mismo modo, acepto que los Derechos de Autor, Morales y Patrimoniales, sobre esta obra, serán compartidos entre mi persona y la Universidad Tecnológica Indoamérica, y que no tramitaré la publicación de esta obra en ningún otro medio, sin autorización expresa de la misma. En caso de que exista el potencial de generación de beneficios económicos o patentes, producto de este trabajo, acepto que se deberán firmar convenios específicos adicionales, donde se acuerden los términos de adjudicación de dichos beneficios.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Quito, a los 21 días del mes de febrero de 2026, firmo conforme:

Autor: Marco Andrés Bolaños Cordero

Firma:

Número de Cédula: 1721769816
Dirección: Pichincha, Quito, Carcelén Alto.
Correo Electrónico: mbolanos3@indoamerica.edu.ec
Teléfono: 0980023254

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “DISEÑO CINEMÁTICO DE UNA MANDRINADORA DE SEIS EJES”, presentado por Marco Andrés Bolaños Cordero, para optar por el Título de Ingeniería Industrial,

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del Par Examinador que se designe.

Quito, 30 de marzo 2026

PABLO ELICIO RON VALENZUELA

Firmado digitalmente por PABLO ELICIO RON VALENZUELA
Fecha: 2026.03.30 09:54:36 -05'00'

……

M.Sc. Pablo Elicio Ron Valenzuela

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Quien suscribe, declaro que los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, como requerimiento previo para la obtención del Título de Ingeniería Industrial, son absolutamente originales, auténticos y personales y de exclusiva responsabilidad legal y académica del autor

Quito, 30 de marzo del 2026

Firmado electrónicamente por:
MARCO ANDRES
BOLANOS CORDERO
Validar únicamente con FirmaEC

.....

Marco Andrés Bolaños Cordero

C.I. 1721769816

APROBACIÓN PAR LECTOR

El trabajo de Titulación, ha sido revisado, aprobado y autorizada su impresión y empastado, sobre el Tema: “DISEÑO CINEMÁTICO DE UNA MANDRINADORA DE SEIS EJES”, previo a la obtención del Título de Ingeniería Industrial, reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la sustentación del trabajo de titulación.

Quito, 30 de marzo del 2026

Firmado electrónicamente por:
FABIAN ALBERTO
SARMIENTO ORTIZ
Validar únicamente con FirmaEC

……..

MSc. Fabián Sarmiento

LECTOR

Firmado electrónicamente por:
GERARDO RIGOBERTO
ARTEAGA RODRIGUEZ
Validar únicamente con FirmaEC

……

MSc. Gerardo Arteaga

LECTOR

DEDICATORIA

A mi madre, por ser el pilar más importante en mi vida, por su amor incondicional, su ejemplo de fortaleza y por enseñarme que todo sacrificio tiene un propósito. Este logro es también reflejo de su esfuerzo, apoyo y de los valores que siempre me ha inculcado.

A mi compañera de vida, Rubí Álvarez, por impulsarme a continuar mis estudios, por motivarme a creer en mis capacidades y por acompañarme en cada reto. Gracias por tu paciencia, tu apoyo constante y por recordarme que los sueños se construyen con esfuerzo y valentía.

A mi familia, por ser mi base emocional y mi refugio en los momentos difíciles. Cada palabra de aliento, cada gesto de cariño y su confianza inquebrantable fueron fundamentales para culminar esta etapa.

A mis compañeros, por compartir conmigo largas jornadas de trabajo, aprendizaje y esfuerzo. Gracias por su colaboración, compañerismo y por demostrar que los logros colectivos también fortalecen los individuales. Cada conversación, consejo y apoyo durante este proceso dejó una huella positiva en este camino.

Marco Andrés Bolaños Cordero

AGRADECIMIENTO

Agradezco al gerente general de la empresa Sidertech, señor Stefano Mansutti, por brindarme la oportunidad de formar parte de su compañía y confiar en mis capacidades desde el primer día. Gracias por ofrecerme un espacio donde pude desarrollarme profesionalmente, asumir nuevos desafíos y aprender bajo un liderazgo que inspira, orienta y valora el crecimiento de su equipo. Su apoyo ha sido fundamental en mi formación personal y profesional.

A la gerente de Recursos Humanos, señora Erika Scotti, por su apoyo constante, por creer firmemente en mi potencial y por acompañarme con orientación y confianza durante todo este proceso. Gracias por su guía, por las oportunidades brindadas y por estar presente en momentos clave. Su respaldo ha sido esencial para mi desarrollo y para la culminación de este trabajo.

A la Universidad Tecnológica Indoamérica, por brindarme una formación académica sólida y por ofrecer un entorno de aprendizaje que permitió fortalecer mis conocimientos y competencias profesionales. Agradezco de manera especial a sus docentes, quienes con su dedicación, experiencia y compromiso contribuyeron significativamente a mi formación durante toda la carrera.

Al Ing. Pablo Elicio Ron Valenzuela MSc., tutor de este trabajo de titulación, por su valiosa orientación, paciencia y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación. Sus conocimientos, recomendaciones y apoyo constante fueron fundamentales para la correcta elaboración y culminación de este proyecto académico.

Marco Andrés Bolaños Cordero

Índice de contenidos

APROBACIÓN DEL TUTOR ... iii
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD ... iv
APROBACIÓN PAR LECTOR ... v
DEDICATORIA ... vi
AGRADECIMIENTO ... ix
Índice de contenidos ... 1
RESUMEN EJECUTIVO ... 6
ABSTRACT ... 7
CAPÍTULO I ... 8
Introducción ... 8
Antecedentes ... 9
Justificación ... 13
Objetivos ... 14
Objetivo General ... 14
Objetivos específicos ... 14
CAPÍTULO II ... 16
INGENIERÍA DEL PROYECTO ... 16
Diagnóstico de la situación actual de la empresa ... 16
Análisis de colisiones ... 18
Colisiones críticas identificadas ... 18
Caso 1 Choque del cabezal con la pieza a manufacturar ... 18
Caso 2 Choque entre el husillo y la rotación de la mesa rotatoria ... 19
Caso 3 Choque entre el eje B y eje Y al momento de la rotación de la mesa ... 21
Caso 4 Choque entre el usillo del eje Z y el cabezal horizontal con referencia a la mesa de rotación ... 22
Caso 5 Choque del cabezal horizontal con la pieza a manufacturar ... 23
Caso 6 Choque del cabezal vertical al momento de realizar la rotación con la mesa de trabajo. 24
Resumen de las colisiones presentadas ... 26
Conclusión del diagnóstico ... 26
Área de estudio ... 27
Modelo Operativo ... 28
Desarrollo del modelo operativo ... 28

Parámetros para el diseño 28
Identificación de ejes y límites 29
Diseño CAD de la máquina 29
Enrolamiento en software CAM 29
Programación CAM (Secuencias seguras) 30
Simulación y validación de movimientos 30
CAPÍTULO III 31
PROPUESTA Y RESULTADOS ESPERADOS 31
Presentación de la Propuesta Para el Diseño Cinemático de una Mandrinadora de Seis Ejes 31
Metodología general 31
Parámetros para el diseño 31
Identificación de ejes y límites 32
Diseño CAD de la máquina 33
Desarrollo del modelo matemático de cinemática de la máquina mandrinadora 34
Cadena cinemática y matrices de transformación homogénea (HTM) 35
Parámetros para el diseño y verificación matemática 36
Cálculo del volumen de trabajo 37
Etapa 2: Identificación de ejes y análisis de velocidades 38
Tiempo de desplazamiento lineal 38
Velocidad angular del eje B 38
Ejemplo matemático aplicado (cálculo de posición del punto herramienta) 39
Descripción funcional de los ejes de la mandrinadora: 42
Restricciones cinemáticas 45
Aplicación del diseño cinemático en la resolución de colisiones 46
Enrolamiento en software CAM 47
Importación del modelo CAD y preparación de archivos 47
Programación CAM (Secuencias seguras) 55
Simulación y validación de movimientos 57
Roles y responsabilidades 60
Indicadores de desempeño (KPIs) 60
Plan de implementación y cronograma 61
Resultados esperados 62
Resultados esperados cuantificados 64
Cronograma de implementación de la propuesta 64
Análisis de costos de la propuesta 65
Costo por actividad 65

Evaluación financiera 66
Flujo de caja proyectado 67
Valor Actual Neto (VAN) 67
Tasa Interna de Retorno (TIR) 68
Curva S – Recuperación de la Inversión 69
CAPÍTULO IV 70
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 70
Conclusiones 70
Recomendaciones 71
Anexos 74
Anexo A. Código G utilizado en la simulación 74
Anexo B. Resultados de simulación en BOB CAD-CAM 74
Anexo C. Modelo CAD de la mandrinadora 75
Anexo D. Parámetros técnicos de operación 75
Anexo E. Aprobación de Abstract Departamento de Idiomas 76

Índice de figuras

Figura 1 Colisión 1 19
Figura 2 Colisión 2 20
Figura 3 *Colisión 3* 21
Figura 4 Colisión 4 22
Figura 5 Colisión 5 23
Figura 6 Colisión 6 25
Figura 7 Modelo Operativo CAD-CAM 28
Figura 8 Mandrinadora objeto de estudio 34
Figura 9 Identificación de los ejes de la mandrinadora CNC de seis ejes 42
Figura 10 Cabezal horizontal 44
Figura 11 Cabezal vertical 45
Figura 12 1. Abro BOB CAD-CAM 47
Figura 13 2. Importo el archivo STEP del modelo desde SolidWorks. 48
Figura 14 3. Guardo cada componente independiente en archivo STL 48
Figura 15 4. Crear una carpeta con el nombre de la máquina y guardar todos los archivos STL 49
Figura 16 5. Mover la carpeta hacia la ruta de donde están las máquinas de software Bob CadCam 49
Figura 17 Creación de máquina 50
Figura 18 Configuración general de parámetros de máquina 51
Figura 19 Definición de ejes, direcciones y límites de movimiento 52
Figura 20 Configuración del código G y comunicación software - máquina 53
Figura 21 Configuración multi eje y sincronización de movimientos 54
Figura 22 Programación CAM- Secuencias seguras 56
Figura 23 Ejemplo de código G funcional 57
Figura 24 Simulación y validación de movimientos 59
Figura 25 Diagrama de Gantt-Implementación Abril- Mayo 2026 65
Figura 26 Curva S- Recuperación de la Inversión 69

Índice de Tablas

Tabla 1 Resumen de Colisiones 26
Tabla 2 Relación entre parámetros técnicos y decisiones cinemáticas 32
Tabla 3 Ejes y rangos 33
Tabla 4 Comparación de desempeño antes y después del diseño cinemático 60
Tabla 5 Roles y responsabilidades 60
Tabla 6 KPIs 61
Tabla 7 Cronograma 61
Tabla 8 Comparación estructurada entre diagnóstico y propuesta 63
Tabla 9 Costo estimado de implementación 66
Tabla 10 Flujo de la caja del proyecto 67

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERIAS

CARRERA DE INGENIERIA INDUSTRIAL

TEMA: DISEÑO CINEMÁTICO DE UNA MANDRINADORA DE SEIS EJES

AUTOR: Marco Andrés Bolaños Cordero

TUTOR: MSc. Pablo Elicio Ron Valenzuela

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de titulación desarrolla el diseño cinemático de la mandrinadora CNC INNSE ZENITH ECS 4801 de seis ejes utilizada en SIDERTECH S.A., a partir de la identificación de interferencias mecánicas recurrentes durante el mecanizado multieje con interacción simultánea de los ejes lineales (X, Y, Z, W) y rotacionales (B y C), las cuales no se originan por fallas estructurales sino por la ausencia de un modelo cinemático formal que establezca límites de recorrido, relaciones paramétricas y validaciones digitales previas, generando tiempos improductivos, desgaste prematuro, riesgos operativos y costos por paradas no planificadas. Mediante un diagnóstico técnico se identificaron seis escenarios críticos de colisión, evaluados bajo criterios geométricos y cinemáticos considerando rangos máximos de desplazamiento y configuración estructural; con base en ello se desarrolló un modelo cinemático integral que incluyó modelado 3D en SolidWorks, formulación matemática mediante matrices de transformación homogénea (HTM), definición de zonas seguras y restricciones operativas, y parametrización de los grados de libertad según condiciones reales de operación. El modelo fue integrado en BOB CAD-CAM mediante la creación de la máquina virtual, configuración multieje y activación del sistema de detección de colisiones, permitiendo validar trayectorias antes de su ejecución física y garantizar coherencia entre simulación y comportamiento real. Como resultados se eliminaron virtualmente los eventos de colisión identificados, se redujeron entre 15 % y 20 % los tiempos improductivos y se mejoró la confiabilidad operativa; además, el análisis económico evidenció viabilidad con recuperación de la inversión en el segundo año, VAN positivo y TIR superior a la tasa de descuento, consolidando el diseño cinemático como herramienta preventiva que fortalece la seguridad industrial y la modernización tecnológica del sector metalmecánico ecuatoriano.

DESCRIPTORES: diseño cinemático; interferencias mecánicas; mandrinadora CNC; mecanizado multieje; simulación virtual.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERIAS

CARRERA DE INGENIERIA INDUSTRIAL

THEME: KINEMATIC DESIGN OF A SIX-AXIS BORING MACHINE

AUTHOR: Marco Andrés Bolaños Cordero

TUTOR: MSc. Pablo Elicio Ron Valenzuela

ABSTRACT

This degree project develops the kinematic design of the six-axis INNSE ZENITH ECS 4801 CNC boring machine used at SIDERTECH S.A., addressing recurrent mechanical interferences during multi-axis machining. These interferences involve the simultaneous interaction of linear (X, Y, Z, W) and rotational (B, C) axes and do not stem from structural failures, but rather from the absence of a formal kinematic model defining travel limits, parametric relationships, and prior digital validations. Such issues result in unproductive time, premature wear, operational risks, and unplanned downtime costs. Through a technical diagnosis, six critical collision scenarios were identified and evaluated under geometric and kinematic criteria, considering maximum displacement ranges and structural configurations. Based on this, an integrated kinematic model was developed, including 3D modeling in SolidWorks, mathematical formulation using Homogeneous Transformation Matrices (HTM), the definition of safe zones and operational constraints, and the parameterization of degrees of freedom according to real operating conditions. The model was integrated into BobCAD-CAM through the creation of a virtual machine, multi-axis configuration, and the activation of a collision detection system, allowing for the validation of toolpaths before physical execution to ensure coherence between simulation and real-world behavior. The results show the virtual elimination of identified collision events, a reduction in unproductive time between 15% and 20%, and improved operational reliability. Furthermore, the economic analysis demonstrated viability with an investment recovery in the second year, a positive NPV (Net Present Value), and an IRR (Internal Rate of Return) exceeding the discount rate. This confirms the kinematic design as a preventive tool that strengthens industrial safety and technological modernization within the Ecuadorian metalworking sector.

KEYWORDS: BOB CAD-CAM; Collision detection; Kinematic design; Economic feasibility; Mechanical interferences; CNC boring machine; Homogeneous transformation matrices (HTM); Multi-axis machining; 3D modeling; Process optimization; Industrial safety; Virtual simulation.

CAPÍTULO I

Introducción

La industria manufacturera global se encuentra en una etapa de transformación profunda, marcada por tres grandes pilares: la digitalización, la sostenibilidad y más recientemente, la resiliencia empresarial. Según (Foro Mundial, 2025) estas transformaciones surgen como respuesta a avances tecnológicos acelerados, nuevas regulaciones ambientales y tensiones de carácter geopolítico, factores que obligan a las organizaciones a reconsiderar la manera tradicional en que operan. En este contexto, la manufactura avanzada, apoyada en herramientas como la inteligencia artificial, la automatización inteligente y los principios de un enfoque de producción sostenible se posiciona como un recurso técnico orientado a mejorar el posicionamiento industrial en un panorama global cada vez más dinámico y desafiante.

En el contexto nacional, Ecuador ha mostrado una expansión constante de la actividad industrial metalmecánico, a pesar de los desafíos económicos recientes. De acuerdo con el (Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca, 2025), este sector industrial constituye un componente fundamental dentro de la estructura productiva del país, debido a su importante participación activa en el mercado laboral y al suministro de soluciones tecnológicas e industriales dirigidas a actividades estratégicas, entre las que se destacan la construcción, la minería y la siderurgia. Su papel resulta determinante para potenciar la eficiencia productiva del país y para el desarrollo de encadenamientos productivos que dinamizan la economía. A pesar de la contracción registrada en la manufactura no petrolera durante el año 2024, diversos análisis proyectan una recuperación gradual en el corto y mediano plazo. Esta tendencia estaría impulsada principalmente por procesos de modernización tecnológica, así como por el derivado de la expansión del consumo industrial y productos con un mayor valor agregado, los cuales responden a nuevas

necesidades del mercado y a la sofisticación de la industria (Ministerio de Economía y Finanzas, 2025).

Desde una perspectiva organizacional, la empresa (SIDERTECH S.A, s.f.), ubicada en Quito, Pichincha, ha construido una posición sólida en el diseño, fabricación y montaje de componentes metalmecánicos para la industria siderúrgica y cementera. Fundada en 2008, SIDERTECH ha desarrollado una planta productiva equipada para ejecutar proyectos "llave en mano", incluyendo servicios de mecanizado, mantenimiento, soldaduras especiales y suministro de equipos para acería y laminación. En su operación diaria, la empresa enfrenta desafíos relacionados con la precisión de las operaciones de maquinado y la prevención de colisiones entre piezas y componentes de maquinaria CNC de múltiples ejes, lo que afecta directamente la eficiencia, seguridad y calidad de producción.

En este marco, el presente trabajo de titulación propone el diseño cinemático de una mandrinadora de 6 ejes como herramienta para diagnosticar las principales causas de colisiones en los procesos de mecanizado. El proyecto se orienta a potenciar de la seguridad operativa, el uso eficiente de recursos y el perfeccionamiento de las operaciones industriales de SIDERTECH S.A., alineándose con las tendencias globales de manufactura avanzada y con las necesidades específicas del sector metalmecánico ecuatoriano.

Antecedentes

Las investigaciones relacionadas con el diseño cinemático de máquinas herramientas de múltiples ejes y la prevención de colisiones en procesos de mecanizado han cobrado mayor interés a partir del crecimiento de la complejidad geométrica de las piezas y a la demanda de una mayor precisión dimensional. A nivel internacional, diversos autores coinciden en que el análisis cinemático es un recurso fundamental para optimizar trayectorias, mejorar la seguridad operativa y reducir tiempos improductivos en máquinas

CNC. En un estudio realizado por (Racz, Breaz, & Cioca, mdpi.com, 2020), se demostró que la implementación de modelos cinemáticos incrementa la eficiencia en el mecanizado al prever posibles interferencias entre herramientas, accesorios y componentes estructurales de la máquina.

Por su parte, investigaciones desarrolladas en el ámbito europeo han resaltado el papel de la simulación computacional para minimizar colisiones en máquinas de más de cinco ejes. Según (Denkena, Wichmann, Malek, & Raeker, 2024), la simulación integrada en CAM permite anticipar errores en la programación, mejorando la calidad superficial de la pieza y reduciendo costos asociados a mantenimiento correctivo. Los investigadores indican que, al incrementarse la cantidad de ejes operativos, crece proporcionalmente la probabilidad de colisiones por falta de sincronización en los movimientos simultáneos.

Desde la perspectiva regional, estudios realizados en América Latina evidencian la necesidad de modernizar los procesos industriales mediante el uso de software CAE y CAD orientados al diseño de trayectorias seguras. De acuerdo con (Soori & Arezoo, http://hal.siencie/hal-03024769v1, 2020), el uso de modelos cinemáticos virtuales permite comprender de forma detallada la interacción entre ejes rotacionales y lineales en maquinarias empleadas en industrias metalmecánicas. Su investigación concluye que la simulación previa reduce hasta en un 40 % los riesgos de impacto entre elementos móviles.

En Ecuador, las investigaciones relacionadas con mandrinadoras de múltiples ejes son específicas al sector metalmecánico debido a su aplicación en mantenimiento, rectificación y mecanizado de grandes componentes. Según (Richa, 2023), la implementación de modelos cinemáticos contribuye a optimizar procesos de operaciones metalmecánicas de precisión, vinculadas al mantenimiento estructural de equipos industriales. Asimismo el (Ministerio de

Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca, 2024), señala que el uso de plataformas de diseño digital fortalece la capacidad técnica de las industrias metalmecánicas del país.

Finalmente, se observan estudios aplicados en entornos empresariales donde se evidencia la necesidad de mejorar la planificación de movimientos en máquinas CNC. De acuerdo con (Ferro Tall, 2022), los operadores enfrentan dificultades para evitar colisiones en máquinas de más de cinco ejes cuando no existe un modelo previo que represente la estructura cinemática real. Su estudio concluye que el diseño cinemático virtual constituye un soporte clave para incrementar la vida útil de las máquinas, reducir fallas operativas y mejorar la productividad.

En conjunto, estos antecedentes demuestran la importancia de integrar modelos cinemáticos y simulaciones virtuales en entornos industriales para prevenir interferencias mecánicas, optimizar trayectorias de trabajo y fortalecer la seguridad operativa. Sin embargo, se identifica un vacío investigativo relacionado con la aplicación directa de estas metodologías en mandrinadoras de seis ejes en el contexto ecuatoriano, lo que justifica la pertinencia del desarrollo del presente proyecto.

El entorno metalmecánico requiere la implementación de soluciones automatizadas para optimizar sus procesos y control que permitan mejorar la precisión, seguridad y eficiencia de los procesos de mecanizado. En particular, las máquinas herramienta de múltiples ejes, como las mandrinadoras CNC, requieren un control cinemático riguroso para evitar interferencias o colisiones entre los componentes móviles, las piezas en proceso y las herramientas de corte (Denkena, Wichmann, Malek, & Raeker, 2024), este tipo de eventos no solo ocasiona daños materiales y paradas no planificadas, sino que también repercute negativamente en la productividad, los costos de mantenimiento y la seguridad laboral.

En el caso de Ecuador, el sector metalmecánico constituye una base estratégica para el desarrollo industrial, dado su rol en la provisión de equipos y soluciones técnicas para la construcción, minería y siderurgia (Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca, 2024). No obstante, muchas empresas aún operan con modelos de diseño mecánico tradicionales, sin la incorporación de herramientas digitales que permitan prever colisiones o analizar los desplazamientos simultáneos de ejes rotacionales y lineales. Esto limita la capacidad de respuesta frente a los estándares de manufactura avanzada que demanda el mercado global.

En la empresa SIDERTECH S.A se han identificado dificultades en el control preciso de los movimientos de las mandrinadoras de múltiples ejes utilizadas en la fabricación y mantenimiento de componentes industriales. La falta de un modelo cinemático detallado genera incertidumbre en la planificación de trayectorias y eleva el riesgo de colisiones entre los elementos estructurales de la máquina y las piezas a mecanizar. Estas colisiones ocasionan tiempos de inactividad, deterioro prematuro de las herramientas y pérdidas económicas derivadas de reparaciones y reprocesos.

Diversos estudios confirman que el análisis cinemático y la simulación virtual permiten anticipar errores de programación y mejorar la eficiencia en el mecanizado (Racz, Breaz, & Cioca, mdpi.com, 2020). Por tanto, la ausencia de un modelo cinemático adaptado a las condiciones y configuraciones específicas de una mandrinadora de seis ejes representa un problema técnico relevante para la empresa y para el sector en general.

En este contexto, surge la pertinencia de implementar un modelo cinemático funcional que posibilite representar y analizar los movimientos de los seis ejes de la mandrinadora, con el fin de diagnosticar las causas de colisiones, optimizar la seguridad operativa y mejorar la exactitud dimensional en las operaciones de maquinado. Este estudio busca, además,

contribuir a la modernización tecnológica de la industria metalmecánica ecuatoriana mediante la integración de herramientas de simulación y control digital, en coherencia con los principios de manufactura avanzada y eficiencia productiva.

Justificación

El desarrollo de este proyecto responde a una problemática técnica relevante dentro del entorno industrial, dado que aborda una problemática crítica en los procesos de manufactura avanzada: las colisiones entre las piezas a mecanizar y los componentes de la máquina herramienta. Estas colisiones generan pérdidas económicas, afectan la calidad del producto final y comprometen la seguridad del operador, además de reducir la eficiencia del proceso productivo. A través del diseño cinemático de una mandrinadora de 6 ejes, se busca diagnosticar las principales causas que originan estos eventos, con el objetivo de establecer soluciones técnicas que permitan optimizar el movimiento de los elementos móviles de la máquina. Este enfoque contribuirá directamente a la reducción de fallas operativas, al prolongamiento del tiempo operativo de los elementos mecánicos y a la mejora en la precisión del mecanizado.

Los resultados obtenidos incidirán directamente en la eficiencia de las operaciones industriales de la empresa, al permitir una planificación más segura y eficiente de las trayectorias de mecanizado. Esto contribuirá a reducir los tiempos de inactividad, minimizar los costos por mantenimiento correctivo y evitar daños en los componentes de la máquina. Además, se fortalecerá la capacidad técnica de la empresa para enfrentar desafíos relacionados con la manufactura de alta precisión, lo que representa un avance significativo en términos de productividad y competitividad.

El entorno productivo de la empresa SIDERTECH S.A. será el principal beneficiado con el desarrollo del modelo, quienes trabajan diariamente con maquinaria CNC de alta complejidad. La implementación de mejoras en el diseño cinemático

permitirá a la empresa optimizar sus recursos técnicos y humanos, mientras que los operarios se verán favorecidos con condiciones de trabajo más seguras, confiables y eficientes, reduciendo el riesgo de accidentes y mejorando la calidad de los productos fabricados.

La **utilidad** de este estudio radica en su aplicabilidad directa en el entorno industrial de SIDERTECH S.A., donde se emplean mandrinadoras de múltiples ejes para procesos de alta precisión. Al proporcionar un modelo cinemático detallado, se facilita la planificación de trayectorias seguras, la simulación de movimientos y la prevención de interferencias, lo que mejora la toma de decisiones técnicas.

Finalmente, el proyecto es **factible** tanto técnica como económicamente, ya que se cuenta con acceso de herramientas de modelado computarizado (CAD), aplicaciones de simulación digital y una mandrinadora de 6 ejes en el entorno laboral. Además, el conocimiento técnico disponible y el respaldo de la empresa garantizan la viabilidad del estudio y su implementación práctica.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar el diseño cinemático de una mandrinadora de seis ejes, mediante el dimensionamiento de los componentes de la máquina optimizando la interacción entre sus ejes de movimiento.

Objetivos específicos

- Diagnosticar las principales causas de colisiones en las piezas a manufacturar y en los componentes de la máquina, a través del diseño cinemático optimizando la seguridad operativa y mejorando el desempeño productivo en las tareas de mecanizado.

- Describir los ejes de movimiento de la mandrinadora mediante los planos x, y, z, w, b y c, estableciendo las direcciones de desplazamiento.
- Desarrollar el modelo virtual de la mandrinadora mediante Solid Works y para la simulación de los movimientos en BOB CAD CAM logrando así el maquinado de piezas en la máquina.

CAPÍTULO II

INGENIERÍA DEL PROYECTO

Diagnóstico de la situación actual de la empresa

(SIDERTECH S.A, s.f.) es una entidad industrial con experiencia en diseño mecánico y servicios técnicos especializados, con mayor presencia en los sectores siderúrgico y cementero. Constituida en el año 2008 y localizada en la parroquia de Yaruquí, en la ciudad de Quito, forma parte del grupo internacional **SIDERTECH LLC**, con sede en Estados Unidos. Desde su creación, la organización ha mantenido una visión centrada en el perfeccionamiento constante y a la provisión de soluciones integrales ajustadas a los requerimientos técnicos de sus clientes.

Actualmente, la empresa desarrolla actividades relacionadas con ingeniería aplicada, fabricación de componentes metálicos de gran dimensión, montaje electromecánico, automatización industrial y servicios de mantenimiento especializado. Su cartera de clientes incluye industrias de gran escala como acerías, cementeras, mineras y empresas metalmecánicas, que demandan altos estándares de precisión, resistencia estructural y confiabilidad operativa.

En el contexto actual del sector metalmecánico ecuatoriano, se evidencian exigencias crecientes asociadas a la incorporación de tecnologías de manufactura avanzada y al control seguro de procesos de mecanizado multieje. Las empresas enfrentan la necesidad de optimizar la precisión dimensional, reducir tiempos improductivos y minimizar riesgos operativos en equipos CNC de alta complejidad.

Dentro de este escenario, (SIDERTECH S.A, s.f.) requiere fortalecer la planificación técnica y la validación previa de trayectorias en sus operaciones de mecanizado pesado, particularmente en mandrinadoras CNC de múltiples ejes. La combinación simultánea de

desplazamientos lineales y rotacionales incrementa la probabilidad de interferencias entre cabezales, husillo, mesa giratoria y piezas de gran tamaño si no se dispone de restricciones cinemáticas claramente definidas.

El análisis interno permitió constatar que la empresa dispone de infraestructura adecuada para operaciones de maquinado industrial de gran escala, así como personal técnico con experiencia en procesos de manufactura. No obstante, no se observa la aplicación sistemática de un modelo cinemático formal que establezca límites paramétricos ni la obligatoriedad de simulaciones previas que validen trayectorias antes de la ejecución real en máquina.

Entre las fortalezas identificadas se destaca la experiencia acumulada en ingeniería y mecanizado industrial, así como la capacidad de ejecutar proyectos integrales bajo esquemas "llave en mano". Sin embargo, se detectan oportunidades de mejora relacionadas con la dependencia operativa de la pericia del operador y la inexistencia de restricciones programadas que disminuyan la probabilidad de colisiones durante operaciones multieje.

A partir del diagnóstico efectuado, se determina que la empresa posee condiciones técnicas favorables para implementar un diseño cinemático estructurado que permita integrar modelación matemática, configuración en entorno CAD–CAM y validación digital de trayectorias. La adopción de este enfoque contribuirá a reducir interferencias mecánicas, potenciar el proceso de mecanizado y fortalecer la confiabilidad funcional de la mandrinadora CNC de seis ejes.

En síntesis, (SIDERTECH S.A, s.f.) presenta una base técnica sólida para el desarrollo de sus actividades industriales; sin embargo, existen oportunidades significativas de mejora en el control cinemático y en la prevención sistemática de colisiones durante

operaciones de mecanizado multieje, aspectos que serán abordados en los apartados siguientes del presente proyecto.

Análisis de colisiones

En esta sección se examinan las situaciones de interferencia más relevantes que pueden presentarse en la mandrinadora INNSE ZENITH ECS 4801, la cual cuenta con cabezal horizontal, cabezal vertical, mesa rotatoria y recorridos extendidos en los ejes X, Y, Z y W.

El estudio se fundamenta en evidencia gráfica correspondiente a trabajos ejecutados en la máquina, complementada con información técnica del fabricante. Se evaluaron escenarios potenciales de riesgo considerando los rangos máximos de desplazamiento de cada eje, la geometría de los cabezales, la configuración de la mesa giratoria y las dimensiones de las piezas mecanizadas.

Para cada caso identificado se desarrolla una descripción técnica del evento, el análisis cinemático involucrado, los posibles impactos estructurales y operativos, además de las estrategias orientadas a minimizar interferencias mecánicas o riesgos de colisión.

Colisiones críticas identificadas

Caso 1 Choque del cabezal con la pieza a manufacturar

Se evidencia que, durante la rotación de la mesa, puede producirse una colisión con la columna del eje Y. Además, el cabezal vertical corre riesgo de impactar con la pieza a manufacturar al ejecutar la profundidad de corte, tal como se aprecia en la **Figura 1**.

Descripción técnica: La mesa rotatoria colisiona con la columna del eje Y y el cabezal vertical con la pieza durante la profundidad de corte.

Elementos involucrados: Mesa rotatoria, columna eje Y, cabezal vertical, pieza.

Ejes implicados: Ejes Y, B

Causa del riesgo: Rotación sin límites definidos y aproximación excesiva del cabezal.

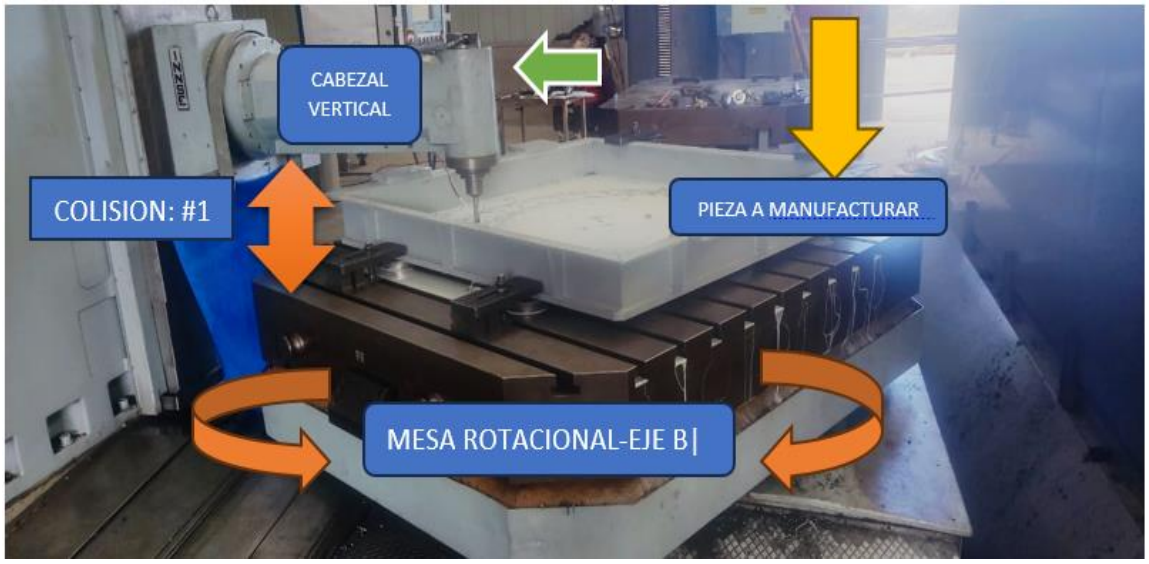
Impacto potencial: Daños en cabezal y pieza, riesgo de parada de máquina.

Medidas preventivas: Implementar límites cinemáticos y simulación previa.

Importancia del diseño cinemático: Permite definir límites de carrera, optimizar. trayectorias y prevenir colisiones mediante simulación y control CNC.

Figura 1

Colisión 1



Caso 2 Choque entre el husillo y la rotación de la mesa rotatoria

Se aprecia que el husillo permanece extendido y, al realizar la rotación de la mesa (eje B), se genera inevitablemente una colisión entre el husillo y la pieza a mecanizar, según se observa en la **Figura 2.**

Descripción técnica: El husillo extendido interfiere con la pieza cuando la mesa (eje B) rota.

Elementos involucrados: Husillo, mesa rotatoria, pieza

Ejes implicados: Ejes W, B

Causa del riesgo: Extensión máxima del husillo sin control de rotación.

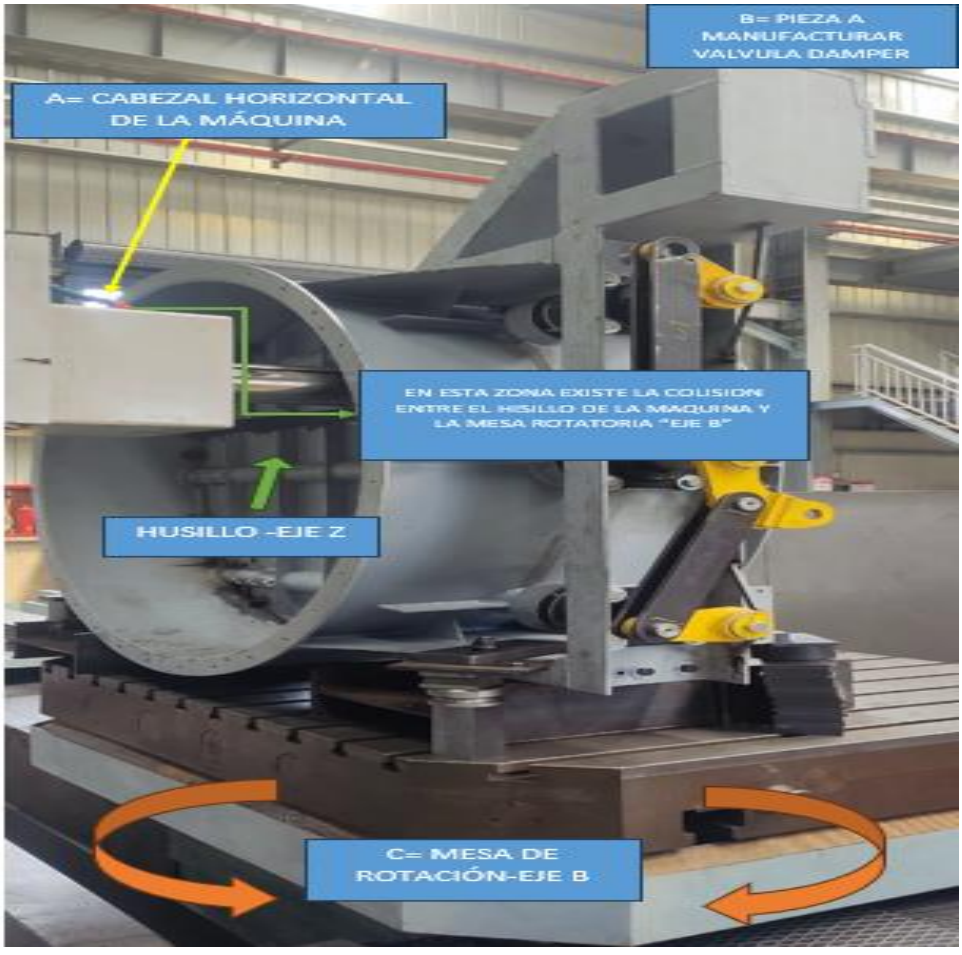
Impacto potencial: Rotura del husillo y daño en pieza.

Medidas preventivas: Definir límites de extensión y bloqueo de rotación en CNC.

Importancia del diseño cinemático: Permite definir límites de carrera, optimizar trayectorias y prevenir colisiones mediante simulación y control CNC.

Figura 2

Colisión 2



Caso 3 Choque entre el eje B y eje Y al momento de la rotación de la mesa

Se distingue la presencia de dos colisiones: la primera entre el eje W y la mesa de rotación (eje B), y la segunda entre la cabeza del cabezal horizontal y la pieza a producir, conforme se ilustra en la **Figura 3**.

Descripción técnica: Colisión del eje W con la mesa rotatoria y del cabezal horizontal con la pieza.

Elementos involucrados: Husillo, mesa rotatoria, cabezal horizontal, pieza.

Ejes implicados: Ejes W, B, X

Causa del riesgo: Movimientos simultáneos sin coordinación cinemática.

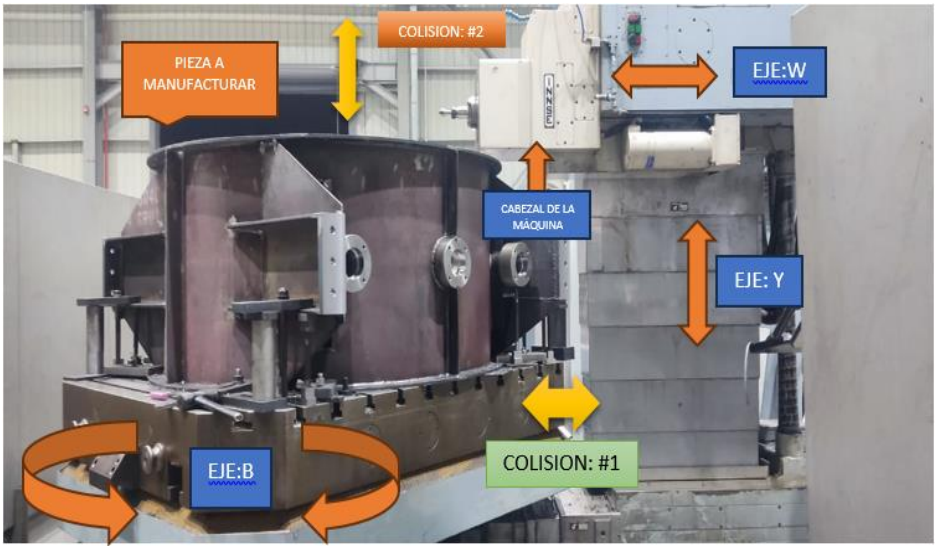
Impacto potencial: Interferencia múltiple, riesgo de daño estructural.

Medidas preventivas: Programación segura y simulación 3D.

Importancia del diseño cinemático: Permite definir límites de carrera, optimizar trayectorias y prevenir colisiones mediante simulación y control CNC.

Figura 3

Colisión 3



Caso 4 Choque entre el usillo del eje Z y el cabezal horizontal con referencia a la mesa de rotación

Se percibe que la colisión ocurre entre el husillo y la mesa de trabajo; adicionalmente, se presenta otra colisión entre el cabezal horizontal y la mesa durante el movimiento de rotación, de acuerdo con la representación gráfica de la **Figura 4.**

Descripción técnica: El husillo colisiona con la mesa y el cabezal horizontal con la mesa durante la rotación.

Elementos involucrados: Husillo, mesa, cabezal horizontal

Ejes implicados: Ejes W, B, X

Causa del riesgo: Rotación sin límites y aproximación incorrecta.

Impacto potencial: Daños en mesa y cabezal.

Medidas preventivas: Definir zonas prohibidas en CNC.

Importancia del diseño cinemático: Permite definir límites de carrera, optimizar trayectorias y prevenir colisiones mediante simulación y control CNC.

Figura 4

Colisión 4

Caso 5 Choque del cabezal horizontal con la pieza a manufacturar

Se visualiza que el cabezal horizontal colisiona con la pieza a manufacturar durante la aproximación hacia una referencia estática del mecanizado, tal como se evidencia en la **Figura 5.**

Descripción técnica: Cabezal horizontal colisiona con la pieza al aproximarse a un punto fijo.

Elementos involucrados: Cabezal horizontal, pieza.

Ejes implicados: Eje X

Causa del riesgo: Falta de control en aproximación.

Impacto potencial: Daño en pieza y cabezal.

Medidas preventivas: Optimizar trayectoria y límites de aproximación.

Importancia del diseño cinemático: Permite definir límites de carrera, optimizar trayectorias y prevenir colisiones mediante simulación y control CNC.

Figura 5

Colisión 5

Caso 6 Choque del cabezal vertical al momento de realizar la rotación con la mesa de trabajo

Se advierte que, durante la rotación del cabezal vertical (eje C), la ausencia de un diseño cinemático adecuado provoca una colisión entre la cabeza del cabezal y la mesa de trabajo (eje B). Asimismo, la falta de una cinemática definida impide establecer límites de carrera, lo que puede ocasionar que se excedan los finales de carrera, como se muestra en la **Figura 6.**

Descripción técnica: Cabezal vertical colisiona con la mesa al rotar su cabeza (eje C) por ausencia de diseño cinemático.

Elementos involucrados: Cabezal vertical, mesa.

Ejes implicados: Ejes C, B

Causa del riesgo: Rotación sin límites definidos.

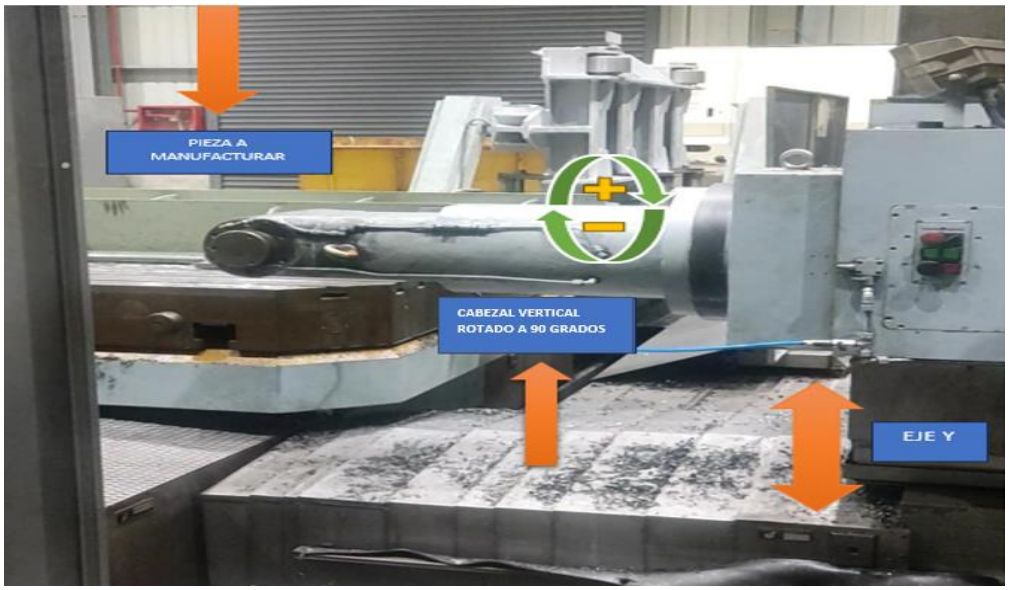
Impacto potencial: Exceso de carrera y colisión estructural.

Medidas preventivas: Implementar diseño cinemático y simulación.

Importancia del diseño cinemático: Permite definir límites de carrera, optimizar trayectorias y prevenir colisiones mediante simulación y control CNC.

Figura 6

Colisión 6



A partir del análisis de las configuraciones presentadas, se identifican condiciones críticas de colisión asociadas principalmente a la extensión del eje W y la orientación simultánea de los ejes rotacionales.

Como criterio de solución cinemática, se establece una relación de restricción entre los ejes, de tal manera que se eviten configuraciones incompatibles durante el mecanizado. Por ejemplo, en situaciones donde el eje W se encuentra en posiciones extendidas, se limita la rotación del eje B para prevenir interferencias entre el husillo y la pieza.

Esta condición puede expresarse como:

Si $Z > 500$ mm $\rightarrow B = 0°$

De esta manera, se introduce una restricción cinemática que permite controlar la interacción entre los ejes, evitando colisiones y garantizando un funcionamiento seguro del sistema. Este enfoque constituye la base del diseño cinemático desarrollado en el Capítulo III.

Resumen de las colisiones presentadas

Se realiza un resumen de las colisiones con el fin de considerarlas para el momento de establecer las medidas necesarias y que en lo posible no vuelvan a suceder, observar en la **Tabla 1.**

Tabla 1

Resumen de Colisiones

Colisión	Elementos involucrados	Ejes	Riesgo	Solución
1	Mesa, columna Y, cabezal vertical, pieza	Y, B	Daño en cabezal y pieza	Límites cinemáticos
2	Husillo, mesa, pieza	W, B	Rotura husillo	Bloqueo rotación
3	Husillo, mesa, cabezal horizontal, pieza	W, B, X	Interferencia múltiple	Simulación 3D
4	Husillo, mesa, cabezal horizontal	W, B, X	Daños en mesa y cabezal	Zonas prohibidas
5	Cabezal horizontal, pieza	X	Daño en pieza	Optimizar trayectoria
6	Cabezal vertical, mesa	C, B	Colisión estructural	Diseño cinemático

El análisis de colisiones en la mandrinadora INNSE ZENITH ECS 4801 ha permitido identificar los principales escenarios de riesgo durante operaciones de mecanizado. La aplicación de estrategias de control tales como simulaciones virtuales, restricciones de desplazamiento y apego a estándares de normas ISO es esencial para garantizar la seguridad operativa y la integridad de los componentes (ISO, 2022).

Conclusión del diagnóstico

El diagnóstico realizado en la empresa (SIDERTECH S.A, s.f.) permitió identificar que, si bien la organización posee una infraestructura técnica sólida y una trayectoria destacada en el ámbito metalmecánico nacional, existen aspectos críticos que requieren

fortalecimiento para mejorar la eficiencia y la seguridad operativa. Las observaciones evidencian que la gestión del mantenimiento continúa siendo predominantemente correctiva, lo que genera tiempos improductivos y un mayor desgaste de los equipos. Además, la ausencia de sistemas formales de monitoreo energético y de indicadores de eficiencia limita la capacidad de control sobre los procesos eléctricos y mecánicos.

Ante esta situación, se identifica la conveniencia de establecer estrategias orientadas hacia el mantenimiento predictivo, la digitalización de procesos y el uso de modelos cinemáticos que permitan anticipar colisiones en las mandrinadoras de múltiples ejes. Estas acciones contribuirán no solo a reducir pérdidas operativas, sino también a optimizar los recursos técnicos y energéticos disponibles. De este modo, la empresa podrá consolidarse como referente en manufactura avanzada dentro del sector metalmecánico ecuatoriano, en coherencia con los principios de la Industria 4.0 y los lineamientos del (Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca, 2024)

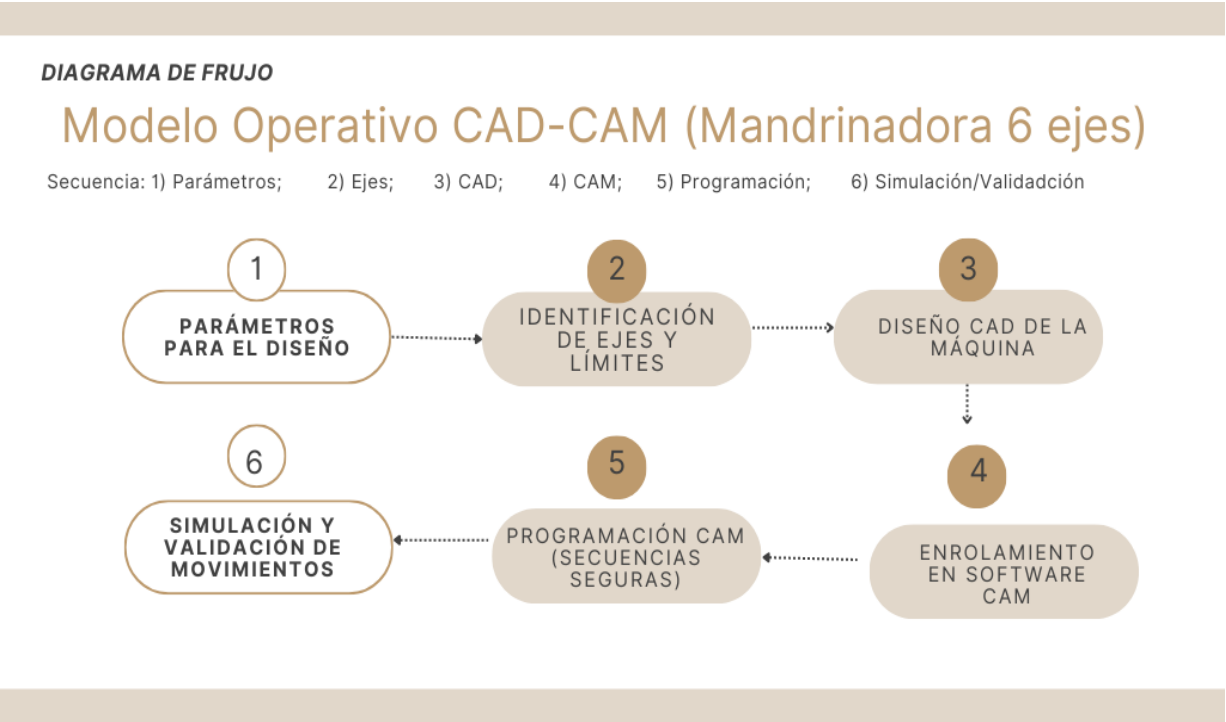
Área de estudio

- **Dominio:** Tecnología y sociedad
- **Línea de investigación:** Sistemas industriales
- **Campo:** Ingeniería Industrial
- **Área:** Mecanizado
- **Aspectos:** Movimientos cinemático
- **Objeto de estudio:** Diseño cinemático de una mandrinadora de 6 ejes
- **Período de análisis:** octubre 2025- marzo 2026

Modelo Operativo

Figura 7

Modelo Operativo CAD-CAM



Desarrollo del modelo operativo

El modelo operativo CAD–CAM para una mandrinadora de seis ejes integra procesos de diseño, programación y simulación orientados a garantizar la seguridad y eficiencia en el mecanizado. Cada etapa del diagrama de flujo responde a una necesidad técnica específica y se fundamenta en prácticas recomendadas por la literatura especializada.

Parámetros para el diseño

Esta fase consiste en recopilar datos técnicos esenciales: dimensiones de la máquina, rangos de desplazamiento de los ejes (X, Y, Z, W, B, C), características del husillo, mesa giratoria y cabezales, así como condiciones de operación (velocidades, avances, potencia). También se incluyen los casos críticos de colisión identificados en la operación real.

Importancia: Sin información precisa, el modelo CAD–CAM no puede representar la cinemática real, lo que incrementa el riesgo de colisiones y errores de programación (Racz, Breaz , & Cioca, 2020).

Identificación de ejes y límites

Se definen los grados de libertad y límites de carrera para cada eje: X, W y Y como desplazamientos lineales de posicionamiento; Z como movimiento telescópico del husillo; y B y C como movimientos rotacionales de la mesa y del cabezal, respectivamente. Con el objetivo de establecer zonas prohibidas y límites seguros para evitar interferencias entre componentes. Esto es clave en máquinas multieje, donde la complejidad aumenta el riesgo de colisiones. (Soori, Arezo, & Dastres, ScienceDirect, 2023)

Diseño CAD de la máquina

Se modela la mandrinadora en software CAD (por ejemplo, SolidWorks), incorporando componentes estructurales (mesa, columna, cabezales), grados de libertad y restricciones, y volúmenes de exclusión para zonas prohibidas.

Beneficio: Permite simular la cinemática antes de la programación, reduciendo riesgos y optimizando trayectorias (Racz, Breaz, & Cioca, SEMANTIC SCHOLAR, 2020).

Enrolamiento en software CAM

El modelo CAD es importado al entorno CAM con el propósito de configurar el proceso de mecanizado, incluyendo la definición del origen de pieza, material en bruto y selección de herramientas. En esta etapa, se asignan los movimientos correspondientes a cada eje del sistema y se habilitan funciones de detección de colisiones entre la herramienta, la pieza y los componentes de la máquina.

La integración CAD–CAM resulta fundamental, ya que permite identificar posibles errores de programación y validar las trayectorias generadas antes de su ejecución en condiciones reales, reduciendo riesgos operativos y mejorando la eficiencia del proceso (Ferrotall, 2022).

Programación CAM (Secuencias seguras)

Se generan trayectorias de mecanizado con macros de seguridad (retracto en Z, reducción de W antes de girar B), bloqueos lógicos para evitar movimientos simultáneos peligrosos y comentarios en el código CNC para control del operador. Objetivo: Garantizar que la programación respete los límites cinemáticos y las zonas prohibidas, reduciendo riesgos de colisión (Denkena , Friebe, & Nein, 2024).

Simulación y validación de movimientos

Se ejecutan simulaciones en CAM con detector de colisiones activo, escenarios equivalentes a los casos críticos identificados y ajuste de parámetros hasta eliminar alertas.

Resultado: Validación completa antes de la ejecución en máquina, asegurando seguridad y eficiencia (Soori, Arezoo, & Dastres, ResearchGate, 2023).

CAPÍTULO III

PROPUESTA Y RESULTADOS ESPERADOS

Presentación de la Propuesta Para el Diseño Cinemático de una Mandrinadora de Seis Ejes

Este capítulo presenta el modelo operativo para diseñar, simular y validar el comportamiento cinemático de una mandrinadora CNC de seis ejes (X, Y, Z, W, B, C). El enfoque integra CAD–CAM, control numérico y buenas prácticas de seguridad para prevenir colisiones, tomando como base el diagnóstico de riesgos expuesto en el Capítulo II y la literatura técnica reciente (Duc, Zirui , Ruiyao , Congbin , & Yongsheng , 2022).

Metodología general

El procedimiento metodológico se estructura en una secuencia iterativa que abarca desde el levantamiento de información y la definición de ejes y restricciones, hasta el diseño CAD, el enrolamiento y programación en CAM, culminando con la simulación y validación del mecanizado. Esta integración de herramientas digitales permite evaluar el proceso de forma anticipada, optimizando la programación y minimizando fallas durante la operación en máquina.

Parámetros para el diseño

En este punto se realiza el levantamiento y estudio de información técnica necesaria para el desarrollo del modelo cinemático. Se consideraron como parámetros principales las dimensiones generales de la máquina, recorridos máximos de los ejes, velocidades de avance, velocidad del husillo, potencia instalada, configuración de cabezales y características de las mesas de trabajo.

La información fue obtenida a partir de la ficha técnica del fabricante y de la observación directa de la mandrinadora en operación dentro de la empresa SIDERTECH S.A. La correcta definición de estos parámetros resulta fundamental, ya que condiciona la fidelidad del modelo CAD–CAM y la validez de los análisis posteriores **Tabla 2**.

Tabla 2

Relación entre parámetros técnicos y decisiones cinemáticas

Parámetro	Valor	Impacto cinemático	Decisión adoptada
Recorrido eje X	4000 mm	Define volumen longitudinal	Mecanizado en una sola fijación
Recorrido eje W	500 mm	Riesgo en rotaciones	Limitación de extensión en CAM
Rotación eje B	360°	Acceso multilateral	Uso de mecanizado 4 ejes
Avance rápido	12000 mm/min	Riesgo en aproximaciones	Retracciones controladas

Identificación de ejes y límites

La máquina dispone de seis ejes: tres ejes lineales de posicionamiento (X, W y Y), un eje telescópico de avance del husillo (Z) y dos ejes rotacionales (B y C).

El sistema presenta seis grados de libertad (GDL), correspondientes a tres ejes lineales de posicionamiento (X, W y Y), un eje telescópico (Z) y dos ejes rotacionales (B y C), los cuales permiten posicionar y orientar la herramienta dentro del volumen de trabajo.

Para cada eje se establecieron los rangos máximos de desplazamiento o rotación, considerando tanto las capacidades físicas de la máquina como las restricciones operativas necesarias para evitar colisiones. Esta etapa permitió definir zonas seguras y zonas prohibidas, constituyendo la base del diseño cinemático y de la programación segura.

Límites y características de los ejes

Se definen los ejes y sus rangos operativos conforme a la configuración de la máquina y a las medidas validadas en planta:

Tabla 3

Ejes y rangos

Eje	Tipo	Rango operativo	Unidad	Notas de seguridad
X	Lineal	Xmin – Xmax	mm	Evitar aproximaciones bruscas del cabezal horizontal
W	Lineal	Wmin – Wmax	mm	Controlar desplazamientos transversales y evitar interferencias laterales
Y	Lineal	Ymin – Ymax	mm	Controlar el desplazamiento vertical del cabezal y evitar interferencias con la mesa y la pieza
Z	Telescópico	Zmin – Zmax	mm	Avance del husillo; riesgo de colisión cuando el eje se encuentra extendido
B	Rotacional	Bmin – Bmax	°	Bloquear rotación si Z > umbral seguro
C	Rotacional	Cmin – Cmax	°	Respetar límites por cableado/carcasa y altura Y

Diseño CAD de la máquina

Con los parámetros y ejes definidos, se desarrolló el modelo tridimensional de la mandrinadora en el software SolidWorks. El diseño CAD incluyó los componentes estructurales principales, tales como mesa giratoria, bancada, columna, cabezales horizontal y vertical, husillo y sistemas móviles, respetando las proporciones y relaciones geométricas reales del equipo.

En la **Figura 8** se presenta el ensamble general de la mandrinadora CNC de seis ejes, donde se observa la disposición de sus componentes principales.

Figura 8

Mandrinadora objeto de estudio

Desarrollo del modelo matemático de cinemática de la máquina mandrinadora

Con el fin de complementar el desarrollo del modelo operativo y demostrar que el diseño cinemático de la mandrinadora CNC no se basa únicamente en representaciones gráficas o simulaciones visuales, a continuación, se presenta una modelación matemática simplificada del sistema (Zhou , Liao, Jiang, & Zhou , 2022). Esta modelación permite describir de manera analítica la relación entre los movimientos de los ejes lineales y rotacionales, así como su influencia directa en la ubicación y alineación del elemento de corte durante el mecanizado.

El análisis matemático se apoya en principios básicos de la cinemática aplicada a máquinas herramientas, empleando relaciones geométricas y transformaciones que permiten validar la coherencia del modelo desarrollado en el entorno CAD–CAM. El objetivo de este apartado no es realizar un desarrollo matemático complejo, sino evidenciar, mediante cálculos representativos, cómo los parámetros de diseño y las configuraciones de los ejes se

traducen en movimientos reales de la máquina, aportando una base analítica que respalda la simulación y la programación multieje realizadas.

Cadena cinemática y matrices de transformación homogénea (HTM)

El modelo de cinemática directa permite determinar la posición y orientación del punto herramienta con respecto al sistema base de la máquina, a partir de los valores de los ejes de movimiento. Para ello, se emplea el producto ordenado de matrices de transformación homogénea de dimensión 4×4, las cuales representan las traslaciones y rotaciones que definen el comportamiento cinemático del sistema.

La mandrinadora CNC analizada cuenta con seis ejes de movimiento:

• Ejes lineales de posicionamiento: X, W y Y

• Eje telescópico: Z

• Ejes rotacionales: B y C

Cada uno de estos ejes representa un grado de libertad, cuya combinación permite posicionar la herramienta dentro del volumen de trabajo de la máquina.

La transformación total del sistema se define como:

$$T = T_X(X) \cdot T_Y(Y) \cdot T_Z(Z) \cdot T_W(W) \cdot R_Y(\theta) \cdot R_Z(\varphi) \cdot T_{tool}$$

Donde:

$T_X(X)$, $T_W(W)$ y $T_Y(Y)$ representan las traslaciones de posicionamiento en los ejes lineales de la máquina.

$T_Z(Z)$ representa el avance telescópico del husillo.

$R_Y(\theta)$ representa la rotación alrededor del eje Y, correspondiente al eje B.

$R_Z(\varphi)$ representa la rotación alrededor del eje Z, correspondiente al eje C.

T_tool representa el desplazamiento geométrico de la herramienta, asociado a su longitud efectiva.

La secuencia de estas transformaciones sigue el orden cinemático de la máquina, partiendo desde el sistema base, continuando con los desplazamientos lineales de posicionamiento y extensión del husillo, y finalizando con los movimientos rotacionales que orientan la herramienta y la pieza.

Las matrices típicas utilizadas en el modelo son las siguientes:

Traslación en X:

$$\mathrm{T_X}(a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Rotación alrededor de Y (eje B):

$$\mathrm{R_Y}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Rotación alrededor de Z (eje C):

$$\mathrm{R_Z}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Parámetros para el diseño y verificación matemática

La definición de los parámetros técnicos constituye la base del diseño cinemático. A partir de los recorridos máximos de los ejes lineales y de los rangos de rotación de los ejes

rotacionales, se estableció el volumen de trabajo efectivo y se verificó la viabilidad del mecanizado en una sola fijación.

Los parámetros utilizados en los cálculos corresponden a condiciones reales de operación de la mandrinadora, obtenidas a partir de la ficha técnica del fabricante y validadas en campo. Estos valores permiten garantizar la coherencia entre el modelo matemático y el comportamiento real de la máquina.

Para el desarrollo del modelo cinemático y los cálculos asociados, se consideraron los siguientes parámetros reales de operación de la mandrinadora CNC:

- Velocidad de avance: 6000 mm/min (1)
- Velocidad del husillo: 6 rpm
- Recorrido eje X: 4000 mm
- Recorrido eje Y: 2500 mm
- Recorrido eje Z: 1995 mm
- Longitud de herramienta: 200 mm

Estos valores fueron definidos con base en la ficha técnica del equipo y condiciones reales de operación en la empresa SIDERTECH S.A.

Los parámetros técnicos utilizados en los cálculos se detallan en el **Anexo D.**

Cálculo del volumen de trabajo

$$V = X_{max} \cdot W_{max} \cdot Y_{max} \quad (2)$$

Los recorridos considerados para el volumen de trabajo son los siguientes:

$X_{max} = 4000$ mm, $W_{max} = 2500$ mm y $Y_{max} = 1995$ mm.

Reemplazando se tiene

$$V = 4000 \times 2500 \times 1995$$

$$V = 19{,}95\ m^3$$

Este resultado demuestra que la mandrinadora posee la capacidad dimensional necesaria para mecanizar piezas de gran tamaño sin requerir múltiples montajes.

Etapa 2: Identificación de ejes y análisis de velocidades

Una vez definidos los recorridos, se procedió a analizar los ejes desde el punto de vista cinemático, considerando tanto movimientos lineales como rotacionales y su posible interpolación durante el mecanizado.

Tiempo de desplazamiento lineal

$$V = \frac{\Delta s}{\Delta t} \qquad (3)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{V}$$

Para un desplazamiento de 2000 mm en el eje X con un avance de 6000 mm/min:

$$\Delta t = \frac{2000}{6000}$$

$$\Delta t = 0{,}333\ \text{min} \approx 20\ \text{s}$$

Velocidad angular del eje B

$$\omega = \frac{2\pi.n}{60}$$

Para una velocidad de rotación de 6 rpm:

$$\omega = \frac{2\pi.6}{60}$$

$$\omega = 0{,}628\ \text{rad/s}$$

Ejemplo matemático aplicado (cálculo de posición del punto herramienta)

Para validar el modelo cinemático desarrollado, se plantea el siguiente caso:

Parámetros de entrada:

X = 1200 mm

• W = 300 mm

• Y = 150 mm

• Z = 800 mm

• θ = 30°

• φ = 45°

• L = 200 mm

L a transformación total se define como:

T = T_X(1200) · T_W(300) · T_Y(150) · T_Z(800) · R_Y(30°) · R_Z(45°) · T_tool

Donde

El eje Y corresponde al desplazamiento vertical del cabezal, mientras que el eje Z representa el avance del husillo (movimiento telescópico). El eje W corresponde al desplazamiento lineal transversal del conjunto móvil.

Además, T_tool = T_Z(-L), siendo L la longitud de la herramienta.

En este modelo, el desplazamiento de la herramienta se representa como una traslación en el eje Z negativo, correspondiente a la longitud efectiva de la herramienta.

Desarrollo del cálculo

La multiplicación de matrices se realiza de forma secuencial:

$T_1 = T_X \cdot T_Y$

$T_2 = T_1 \cdot T_Z$

$T_3 = T_2 \cdot T_W$

$T_4 = T_3 \cdot R_Y$

$T_5 = T_4 \cdot R_Z$

$T = T_5 \cdot T_Z(-L)$

Finalmente, la posición del punto herramienta se determina como:

$p = T \cdot [0\ 0\ 0\ 1]^T$

Como ejemplo del desarrollo del cálculo, se realiza la multiplicación parcial entre las matrices de traslación en X y Y:

$T_X(1200) \cdot T_Y(300) =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1200 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 300 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$=$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1200 \\ 0 & 1 & 0 & 300 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

El resultado obtenido corresponde a la combinación de los desplazamientos en los ejes X e Y, evidenciando que la posición final del sistema incorpora simultáneamente ambos movimientos. Este procedimiento se aplica de manera secuencial para el resto de matrices

que conforman la cadena cinemática, permitiendo determinar la posición y orientación final de la herramienta respecto a la base de la máquina.

Este tipo de cálculo permite:

- Verificar la coherencia entre la cinemática configurada en el software CAM y el desplazamiento esperado.
- Validar los límites físicos de operación antes de la ejecución (por ejemplo, que el eje Z no exceda su recorrido).
- Facilitar la detección de interferencias mediante la comparación de distancias entre máquina, herramienta y pieza.

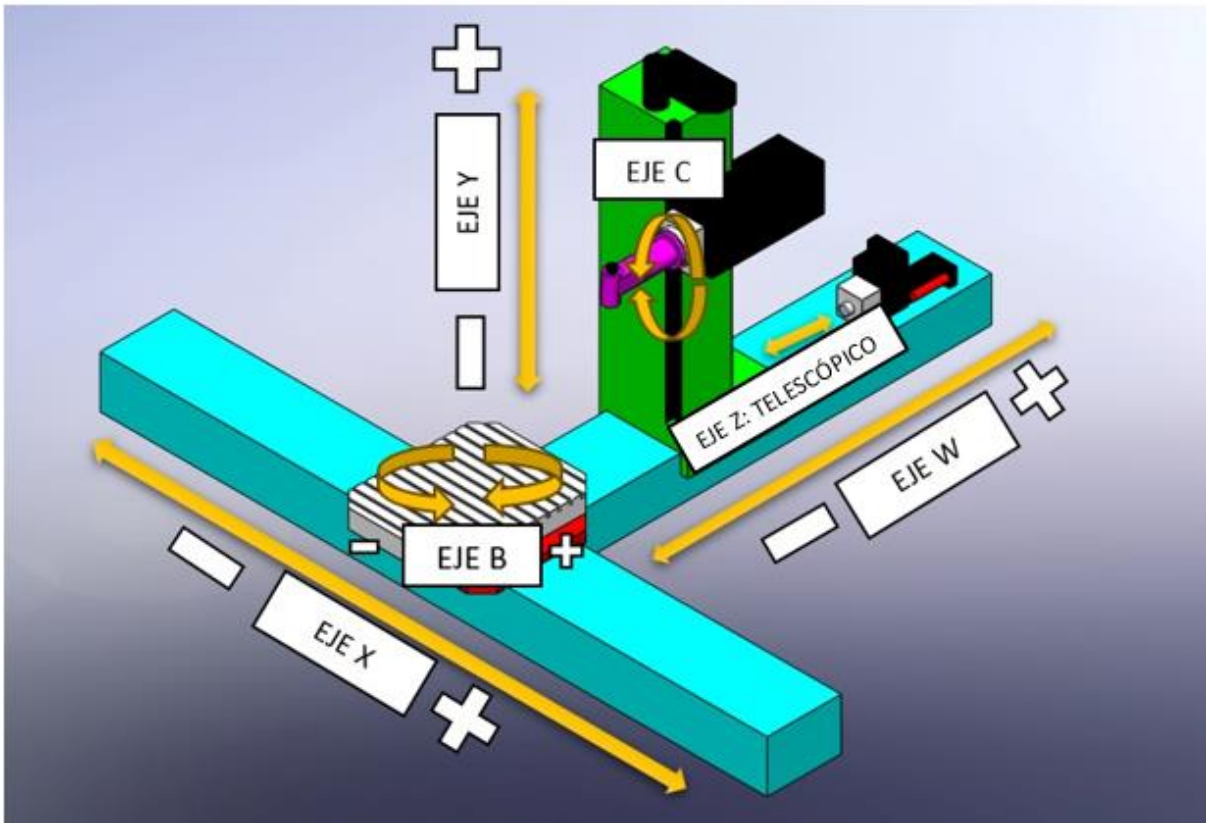
Adicionalmente, este análisis permite identificar de forma clara los ejes lineales (X, Y, Z y W) y los ejes rotacionales (B y C) dentro del modelo CAD de la mandrinadora.

En esta sección se presenta la integración del modelo cinemático en el entorno CAD-CAM, con el objetivo de validar el comportamiento de la máquina mediante simulación virtual. Este proceso permite verificar la coherencia entre el modelo matemático, la configuración de los ejes y la generación de trayectorias seguras antes de su ejecución en la máquina real.

Posteriormente, se modelaron de manera individual las configuraciones de cabezal horizontal y cabezal vertical, las cuales actúan como alternativas del efector final según el tipo de operación de mecanizado **Figura 9.**

Figura 9

Identificación de los ejes de la mandrinadora CNC de seis ejes



La figura 9 presenta la identificación de los seis ejes de la mandrinadora CNC, distinguiendo los ejes lineales X, Y, Z y W, así como los ejes rotacionales B y C.

Descripción funcional de los ejes de la mandrinadora:

• Eje X: Movimiento lineal longitudinal de la mesa o del cabezal, utilizado para posicionar la pieza en sentido horizontal.

• Eje W: Movimiento lineal transversal, que permite el desplazamiento lateral del conjunto estructural de la máquina.

• Eje Y: Movimiento lineal vertical del cabezal, responsable del posicionamiento en altura durante el mecanizado.

• Eje Z: Movimiento telescópico del husillo, utilizado para acercar o alejar la herramienta respecto a la pieza.

• Eje B: Movimiento rotacional de la mesa de trabajo, que permite orientar la pieza para mecanizado en diferentes caras.

• Eje C: Movimiento rotacional del cabezal, que permite modificar la orientación de la herramienta durante operaciones multieje.

Los ejes lineales X, W y Y controlan los desplazamientos de posicionamiento de la herramienta y la pieza dentro del volumen de trabajo, mientras que el eje Z regula el avance telescópico del husillo. Los ejes rotacionales B y C permiten la orientación de la mesa y del cabezal para operaciones de mecanizado multieje.

La representación gráfica incluye el sentido positivo y negativo de cada eje, lo cual resulta fundamental para la definición de la cadena cinemática, la programación en entorno CAM y la prevención de colisiones durante la operación.

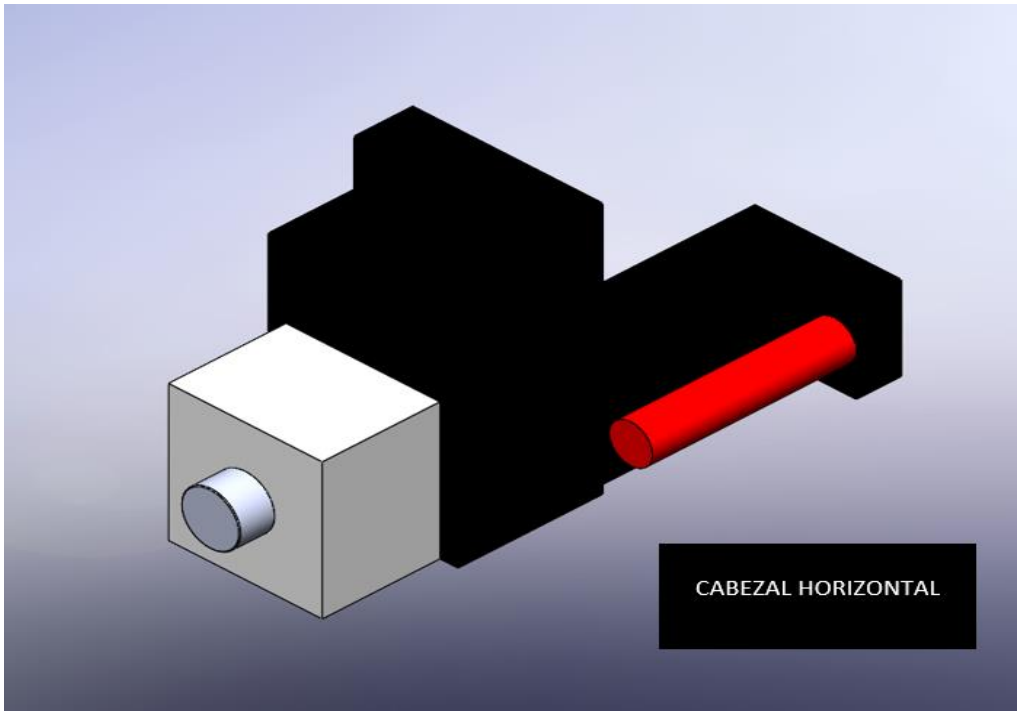
Esta identificación constituye la base para la formulación del modelo matemático y la definición de restricciones cinemáticas del sistema.

El modelo tridimensional completo de la mandrinadora se presenta en el **Anexo C.**

Configuración del cabezal horizontal modelado en SolidWorks, utilizado principalmente para operaciones de mandrinado y mecanizado longitudinal **Figura 10**.

Figura 10

Cabezal horizontal

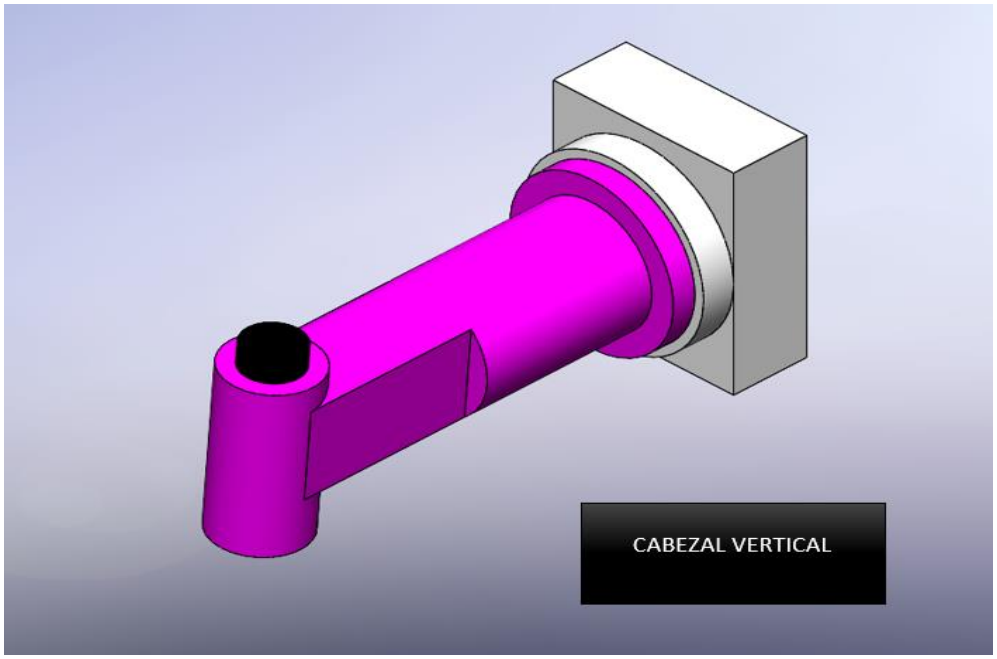


Configuración del cabezal vertical modelado en SolidWorks, empleado para operaciones de fresado y mecanizado vertical.

El modelo CAD incorporó las restricciones de movimiento correspondientes a cada eje, permitiendo representar de forma realista la cinemática de la máquina. Asimismo, se modelaron las distintas configuraciones de cabezal y mesa, lo que facilitó la identificación visual de posibles interferencias entre componentes **Figura 11.**

Figura 11

Cabezal vertical



A partir de la configuración mostrada en la Figura 11, se identifican las restricciones cinemáticas necesarias para evitar interferencias durante el mecanizado.

Restricciones cinemáticas

Con el fin de evitar interferencias mecánicas durante el mecanizado multieje, se establecieron las siguientes restricciones:

- Se limita la rotación del eje B cuando el eje Z se encuentra en posiciones extendidas, evitando colisiones entre el husillo y la pieza.
- Se restringe el movimiento del eje C cuando el eje Y está en posiciones cercanas a la mesa, previniendo interferencias con la superficie de trabajo.
- Se definen zonas de exclusión en el entorno de la mesa rotatoria para evitar contacto con el cabezal.
- Se controla la aproximación del eje X para impedir impactos del cabezal horizontal con la pieza.

Estas restricciones permiten garantizar un funcionamiento seguro mediante la coordinación controlada de los ejes.

A partir de las restricciones identificadas, se plantea la aplicación del diseño cinemático como solución para el control de movimientos y la prevención de colisiones.

Aplicación del diseño cinemático en la resolución de colisiones

El diseño cinemático permite establecer relaciones entre los ejes de la máquina con el fin de prevenir interferencias.

Como ejemplo representativo, se analiza el caso de colisión entre el eje Z (husillo telescópico) y el eje B (mesa rotatoria).

Condición de riesgo:

Cuando el eje Z se encuentra extendido y la mesa inicia rotación, se genera una posible colisión.

Solución implementada:

Se establece una restricción cinemática:

Si $Z > 500$ mm $\rightarrow B = 0°$

Resultado:

Se evita la colisión al impedir movimientos simultáneos incompatibles, garantizando un funcionamiento seguro.

Este enfoque demuestra que el diseño cinemático no solo describe el sistema, sino que permite controlar su comportamiento mediante relaciones matemáticas entre los ejes, garantizando seguridad operativa.

Enrolamiento en software CAM

El proceso de integración de la mandrinadora CNC en el software BOB CAD-CAM se desarrolló de manera estructurada, con el objetivo de garantizar que la máquina virtual represente fielmente su comportamiento cinemático real.

Importación del modelo CAD y preparación de archivos

El procedimiento inicia con la apertura del software BOB CAD-CAM y la importación del modelo tridimensional de la mandrinadora previamente desarrollado en SolidWorks, utilizando el formato STEP. Este formato permite conservar la geometría y las relaciones espaciales entre los componentes principales de la máquina.

Figura 12

1. Abro BOB CAD-CAM

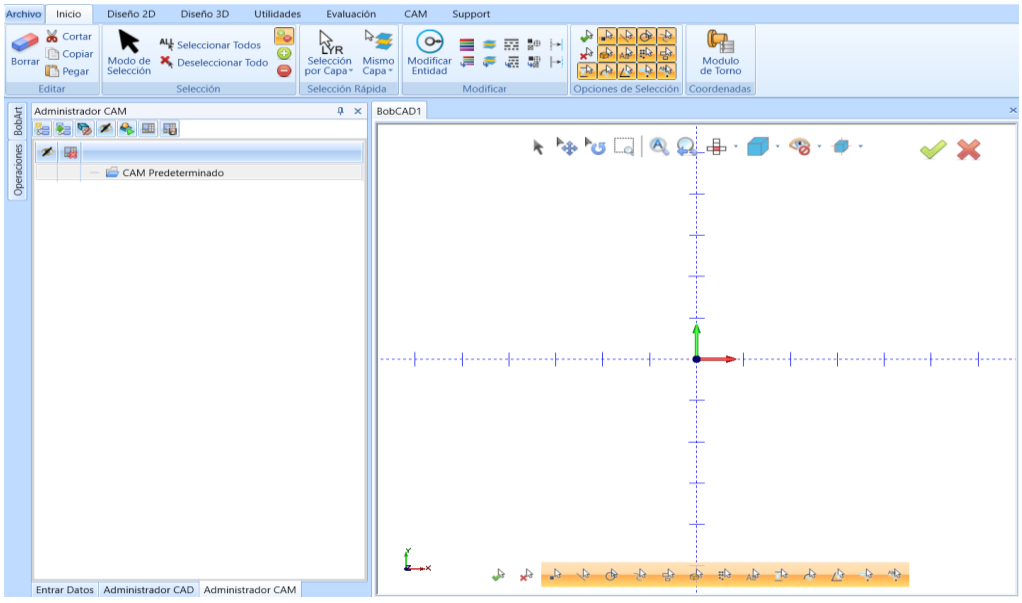


Figura 13

2. *Importo el archivo STEP del modelo desde SolidWorks.*

Posteriormente, cada componente del ensamblaje fue guardado de manera independiente en formato STL. Esta separación facilita el reconocimiento individual de los elementos móviles y fijos dentro del entorno CAM, permitiendo una asignación precisa de ejes y restricciones de movimiento.

Figura 14

3. *Guardo cada componente independiente en archivo STL*

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
BANCADA EJE X.STL	14/1/2026 19:19	Archivo STL	1 KB
EJE B.STL	14/1/2026 19:10	Archivo STL	30 KB
EJE W .STL	14/1/2026 19:23	Archivo STL	12 KB
EJE Y.STL	14/1/2026 19:24	Archivo STL	40 KB
ENSAMBLE T MAN-500 - EJE Z-1.STL	14/1/2026 19:25	Archivo STL	19 KB
ENSAMBLE T MAN-500 - T-MAN 500-1.S...	14/1/2026 19:25	Archivo STL	48 KB
ENSAMBLE TS-AR - TS-AR 1-1.STL	14/1/2026 19:24	Archivo STL	54 KB
ENSAMBLE TS-AR - TS-AR-1.STL	14/1/2026 19:24	Archivo STL	52 KB
SOPORTE EJE B.STL	14/1/2026 19:09	Archivo STL	10 KB

Los archivos STL generados fueron organizados en una carpeta específica con el nombre de la máquina, la cual fue ubicada en el directorio correspondiente a las máquinas

personalizadas del software BOB CAD-CAM. Esta organización garantiza un acceso ordenado y evita conflictos con otras configuraciones existentes.

Figura 15

4. *Crear una carpeta con el nombre de la máquina y guardar todos los archivos STL*

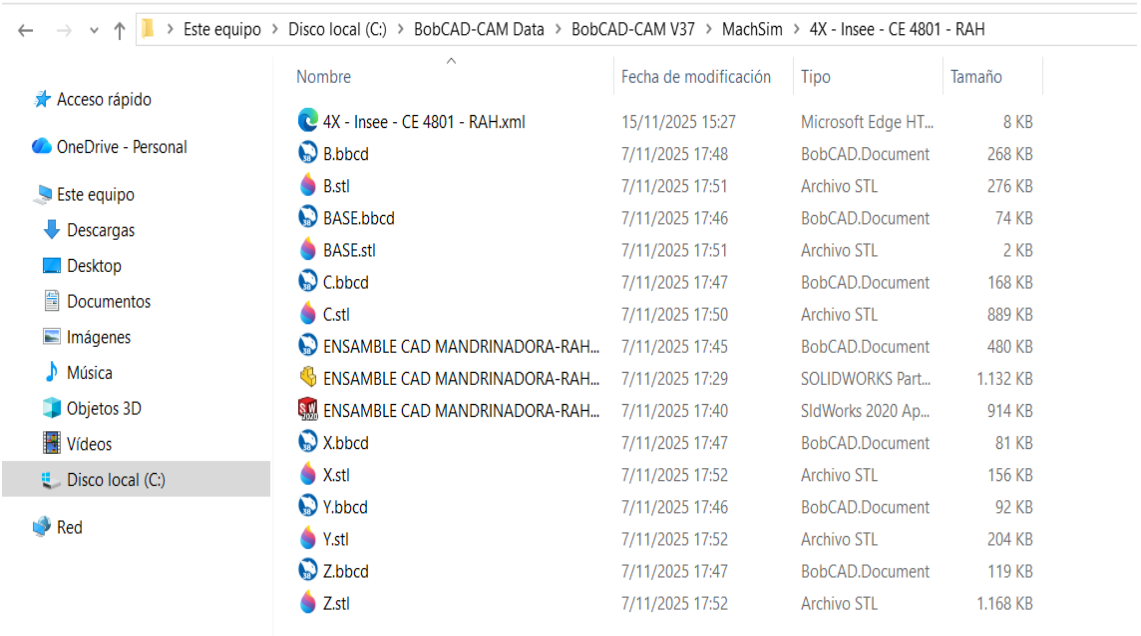
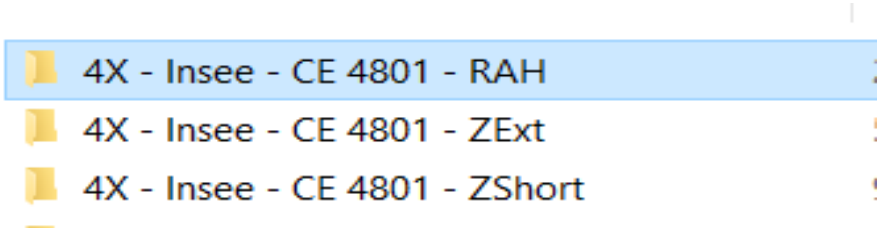


Figura 16

5. *Mover la carpeta hacia la ruta de donde están las máquinas de software Bob CadCam*

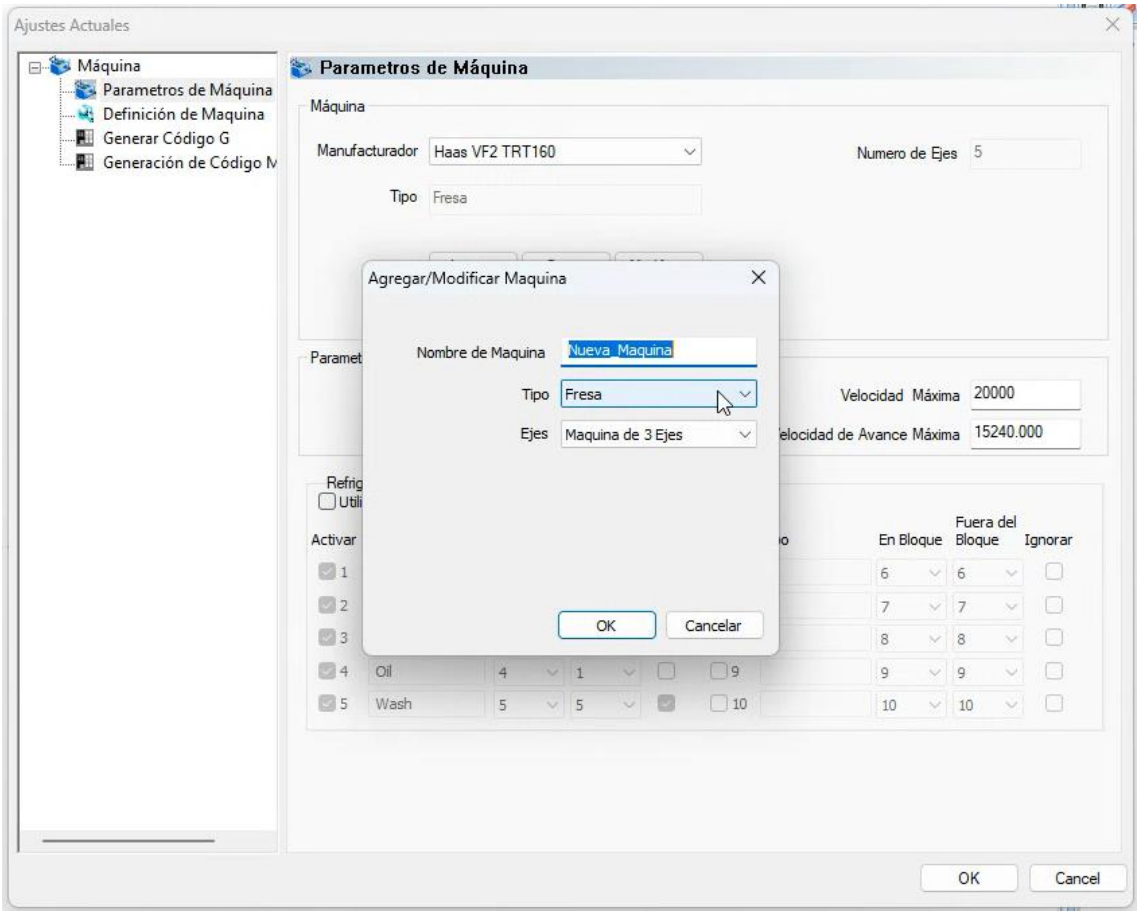


Creación y configuración de la máquina personalizada

Una vez preparados los archivos, se accedió al apartado de configuración de máquinas dentro del entorno CAM, seleccionando la opción para agregar una nueva máquina. En esta etapa se definió el nombre de la mandrinadora, el tipo de máquina y el número total de ejes, estableciendo la base de la configuración cinemática.

Figura 17

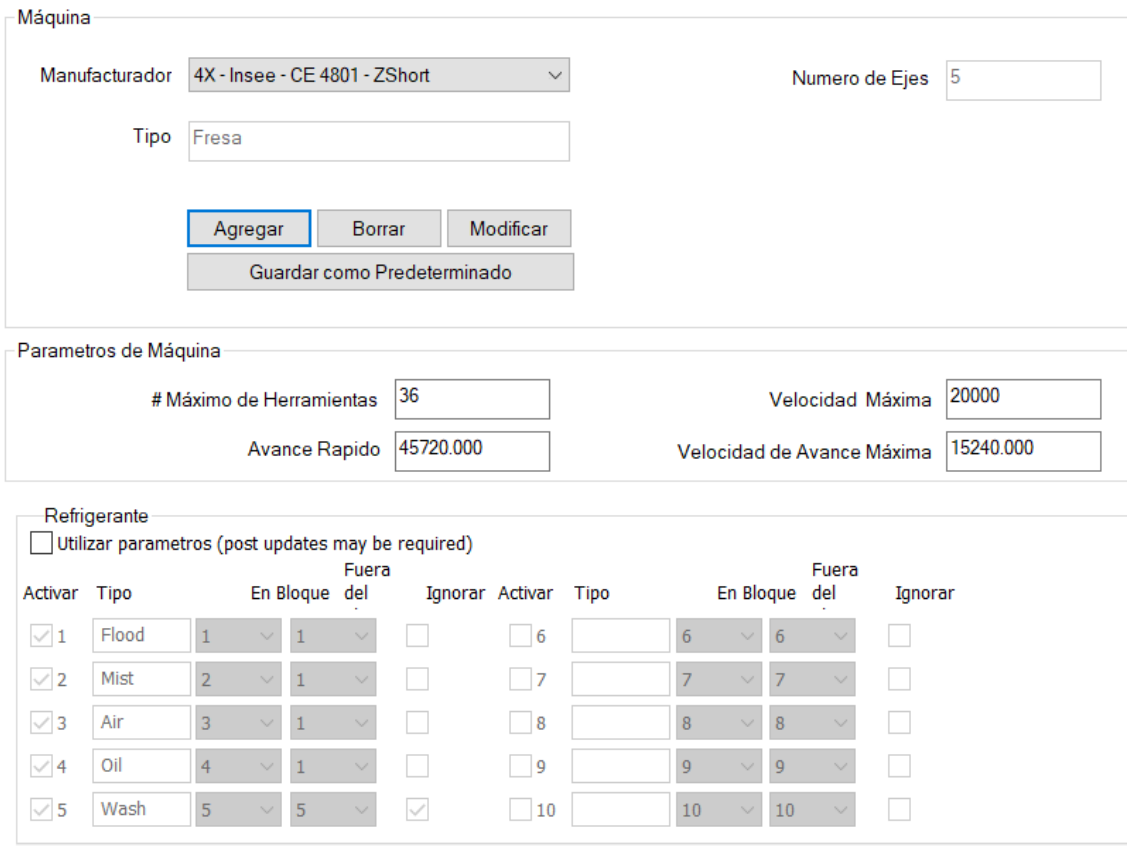
Creación de máquina



A continuación, se configuraron los parámetros generales de operación, tales como la capacidad del sistema de herramientas, la velocidad máxima del husillo, los avances máximos de trabajo y los avances rápidos. Asimismo, se habilitaron las opciones de salida de refrigerante y aire, elementos relevantes para la simulación realista del proceso de mecanizado.

Figura 18

Configuración general de parámetros de máquina



Los parámetros definidos para la simulación y configuración del modelo fueron seleccionados en base a la ficha técnica del fabricante y a condiciones reales de operación observadas en la empresa.

Esta selección permite garantizar un equilibrio entre eficiencia de mecanizado, estabilidad del proceso y seguridad operativa, evitando sobrecargas y posibles colisiones durante la ejecución.

Definición de ejes, direcciones y límites de movimiento

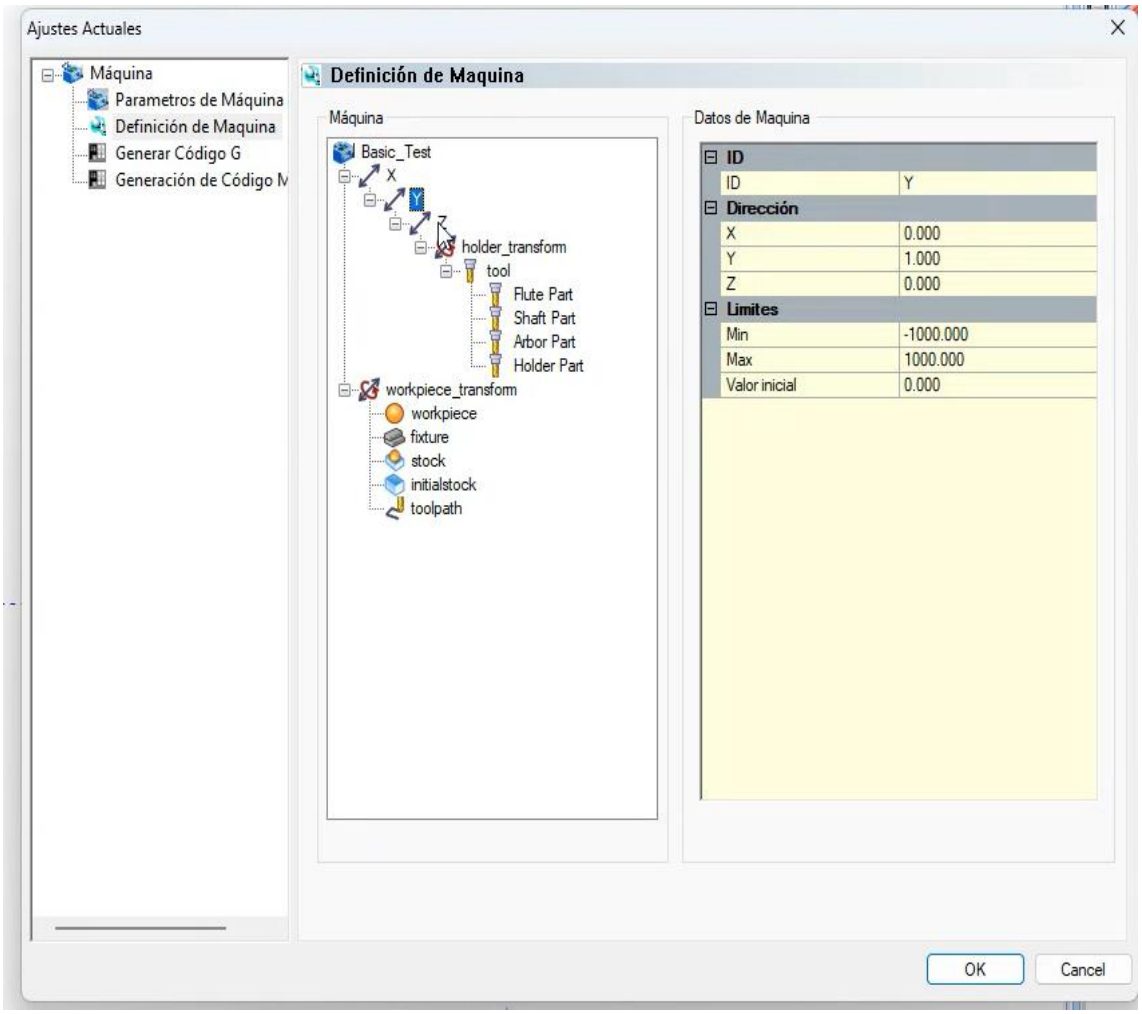
En esta etapa se procedió a la identificación y configuración de los ejes de la máquina dentro del software. Se asignaron los ejes lineales X, Y, Z y W, así como los ejes rotacionales

B y C, definiendo para cada uno el sentido positivo de movimiento, el tipo de desplazamiento y los límites máximos y mínimos de recorrido.

Los valores de límite fueron establecidos con base en la ficha técnica del fabricante y en las condiciones reales de operación de la mandrinadora. Esta configuración resulta crítica, ya que permite al software restringir movimientos fuera del rango permitido y prevenir colisiones durante la simulación.

Figura 19

Definición de ejes, direcciones y límites de movimiento



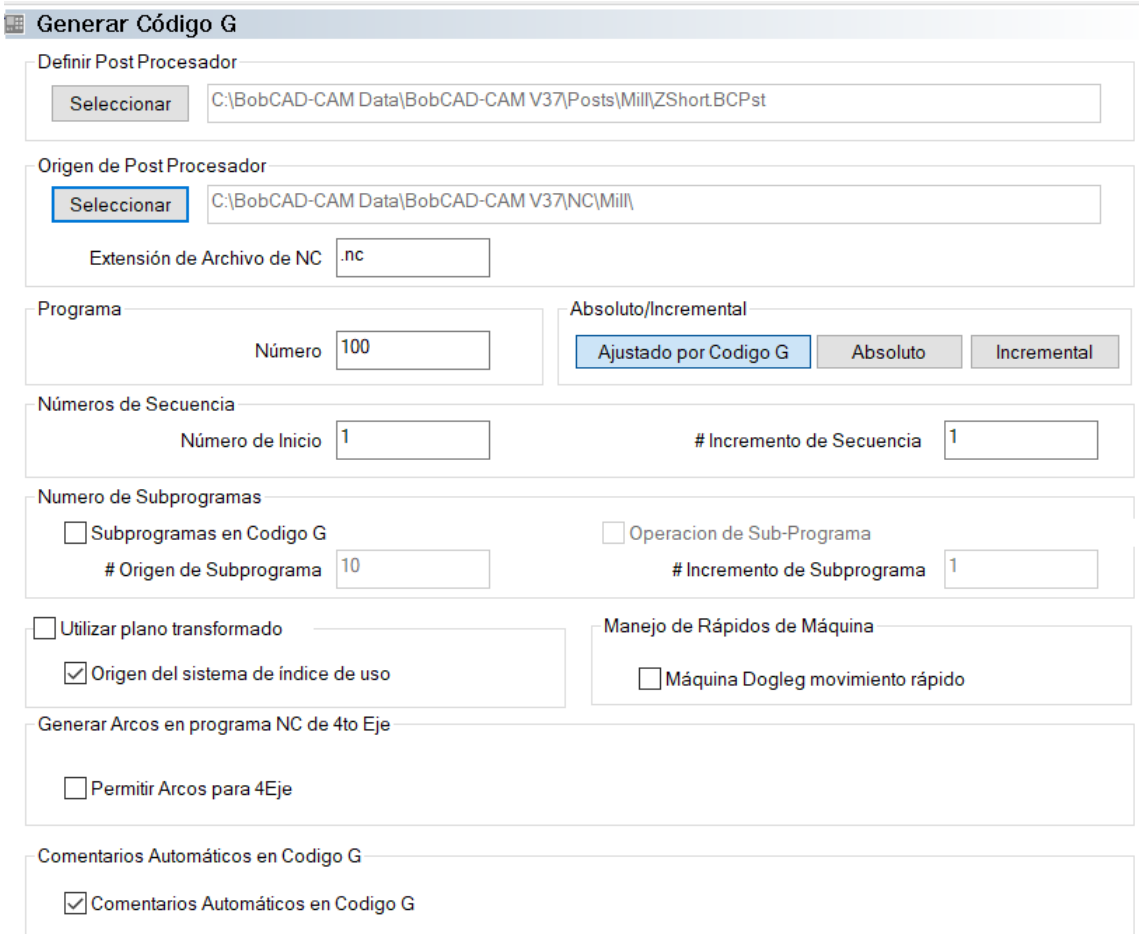
Configuración del código G y comunicación software–máquina

Posteriormente, se realizó la configuración del postprocesador y del código G, definiendo aspectos como la extensión de archivo generada, el modo de programación (absoluto o incremental) y la estructura de comunicación entre el software y la máquina CNC.

Esta etapa asegura que el código generado por BOB CAD-CAM sea compatible con el controlador de la mandrinadora, permitiendo una correcta interpretación de las instrucciones de movimiento durante la ejecución real del mecanizado.

Figura 20

Configuración del código G y comunicación software - máquina



Configuración multi eje y sincronización de movimientos

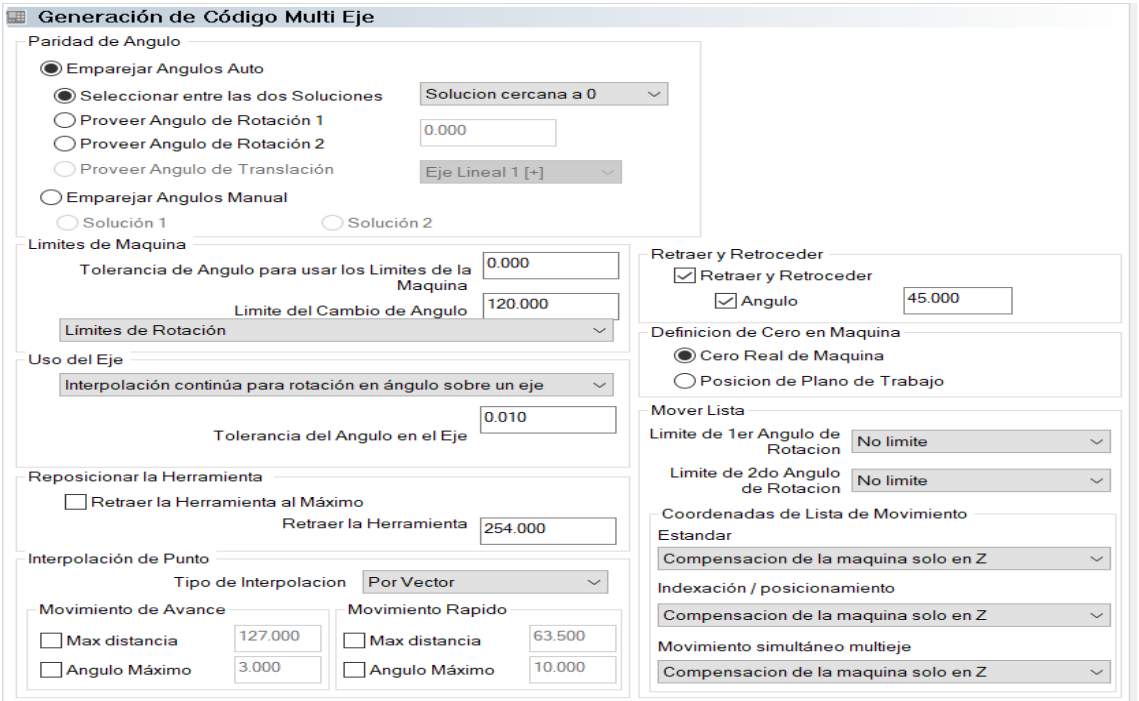
Como fase final del enrolamiento, se configuró la generación de código G para máquinas multi eje. En este apartado se habilitó el trabajo simultáneo de los seis ejes de la mandrinadora, prestando especial atención a la rotación de la mesa de trabajo (eje B) y a la rotación del cabezal vertical (eje C).

La correcta sincronización de estos ejes es fundamental para evitar interferencias entre componentes y garantizar trayectorias seguras, especialmente en operaciones complejas que requieren movimientos combinados.

La ejecución completa de estas etapas permitió obtener una máquina virtual plenamente funcional en el entorno BOB CAD-CAM, sentando las bases para la programación de secuencias seguras y la simulación de movimientos descritas en los pasos posteriores del modelo operativo.

Figura 21

Configuración multi eje y sincronización de movimientos



Programación CAM (Secuencias seguras)

Una vez completado el enrolamiento de la mandrinadora en el entorno BOB CAD-CAM, se procedió a la programación de las trayectorias de mecanizado, incorporando criterios de seguridad orientados a prevenir colisiones y a garantizar la integridad de la máquina, las herramientas y las piezas a mecanizar.

La programación CAM se desarrolló considerando la cinemática completa de la mandrinadora de seis ejes y los escenarios de colisión identificados previamente en el Capítulo II. Para ello, se aplicaron las siguientes estrategias de programación segura:

- Definición de movimientos de aproximación y retracción controlados, priorizando el desplazamiento del eje Z antes de cualquier rotación del eje B o C.
- Limitación de la extensión del eje W durante operaciones que involucren la rotación de la mesa.
- Uso de operaciones multieje para sincronizar desplazamientos lineales y rotacionales.
- Secuenciación lógica de operaciones para reducir reposicionamientos innecesarios.

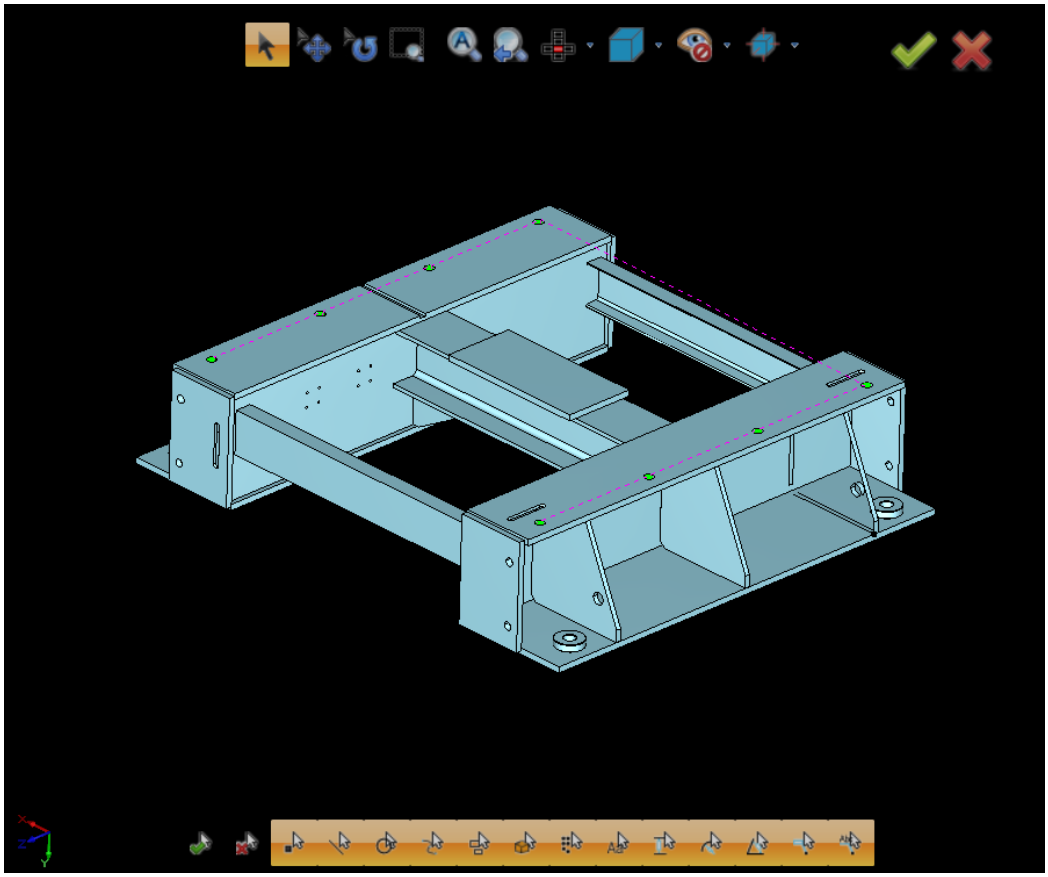
Ejemplo de programación CAM aplicada a una pieza real

Como evidencia del desarrollo de la programación CAM con secuencias seguras, se presenta el mecanizado de una pieza correspondiente a la base de un motor utilizado en una acería. Esta pieza se caracteriza por sus grandes dimensiones, lo que tradicionalmente requeriría realizar el mecanizado en dos etapas o múltiples montajes.

No obstante, mediante el uso de la rotación de la mesa (eje B) y la programación simultánea de cuatro ejes (X, Y, W y B), fue posible mecanizar la pieza en una sola configuración. Esta estrategia permitió aprovechar al máximo las capacidades de la mandrinadora CNC, optimizando los tiempos de mecanizado y reduciendo significativamente las horas hombre asociadas al proceso.

Figura 22

Programación CAM- Secuencias seguras



Pieza tipo base de motor programada en el entorno BOB CAD-CAM, donde se observan las trayectorias generadas y la orientación de la pieza respecto a la mesa rotatoria.

El código G completo generado para la simulación se incluye en el **Anexo A.**

Ejemplo de código G funcional

A continuación, se presenta un fragmento representativo del código G generado para la operación descrita, el cual fue validado y aceptado por el control de la mandrinadora:

En este fragmento se evidencia la activación del sistema de coordenadas de trabajo (G54), el posicionamiento absoluto (G90), la rotación controlada de la mesa mediante el eje B y la interpolación simultánea de los ejes X, Y y W durante el mecanizado. La correcta

sincronización de estos movimientos es fundamental para garantizar trayectorias seguras y precisas en operaciones multieje.

Figura 23

Ejemplo de código G funcional

PRUEBA SIMULTANEO TMAN.nc

```
(FUNCION 2 EJES AUTOMATIC ROTATION 1)

(Operation Note Section ------------)
(TOOL #1 12.7 1/2 FLAT ROUGH ENDMILL - LONG)
N03 T1 M06
N04 G54.1
N05 G90 X0. W1197.647 B-45.553 C00. S595 M03
N06 Y262.5 M08
N07 Y242.5
N08 Y240.5
N09 G01 Y237.5 F84.757
N10 W1198.45 Y237.486 B-45.594
N11 W1199.176 Y237.473 B-45.638
N12 W1199.822 Y237.459 B-45.685
N13 W1200.381 Y237.445 B-45.734
N14 W1200.851 Y237.432 B-45.786
N15 W1201.227 Y237.418 B-45.839
N16 W1201.508 Y237.404 B-45.893
N17 W1201.69 Y237.39 B-45.949
N18 W1201.773 Y237.377 B-46.004
N19 W1201.757 Y237.363 B-46.06
N20 W1201.64 Y237.349 B-46.116
N21 W1201.425 Y237.336 B-46.171
N22 W1201.112 Y237.322 B-46.225
N23 W1200.704 Y237.308 B-46.278
N24 W1200.204 Y237.295 B-46.328
N25 W1199.615 Y237.281 B-46.377
N26 W1198.942 Y237.267 B-46.423
N27 W1198.189 Y237.253 B-46.466
```

La inclusión de este ejemplo confirma la aplicabilidad real del modelo operativo y demuestra que la programación CAM desarrollada es funcional y compatible con la mandrinadora CNC de seis ejes utilizada en la empresa SIDERTECH S.A.

Simulación y validación de movimientos

La simulación y validación de movimientos constituye la etapa final del modelo operativo CAD–CAM y tiene como finalidad comprobar que el diseño cinemático, el enrolamiento de la máquina y la programación CAM desarrollados permiten una operación segura, eficiente y libre de colisiones antes de su ejecución en la mandrinadora real.

La literatura especializada destaca que la simulación previa al mecanizado en máquinas CNC multieje permite identificar interferencias, verificar límites de recorrido y

reducir riesgos operativos, contribuyendo a la disminución de costos asociados a errores de programación y daños en equipos (Groover, 2020) . En este contexto, la validación virtual actúa como un mecanismo estratégico para validar la confiabilidad del proceso productivo.

Para este propósito se utilizó el módulo de simulación de BOB CAD-CAM, con la máquina personalizada previamente configurada y el sistema de detección de colisiones activado. Durante la simulación se ejecutó el programa CAM correspondiente al mecanizado de la base de motor, evaluando el comportamiento dinámico de la máquina virtual.

En la simulación se evidenció el funcionamiento simultáneo de los ejes lineales y rotacionales de la mandrinadora, específicamente los ejes X, W, Y (lineales de posicionamiento), Z (telescópico) y B, C (rotacionales), lo que confirma la correcta implementación del modelo cinemático. La rotación controlada de la mesa (eje B) y del cabezal (eje C), combinada con los desplazamientos lineales, permitió acceder a distintas zonas de la pieza sin necesidad de reposicionamientos adicionales.

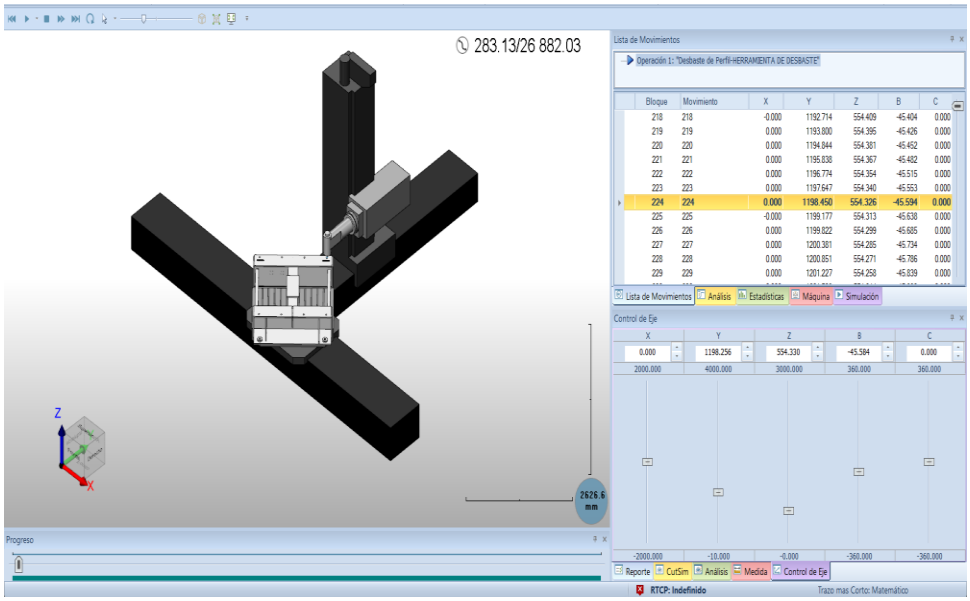
Los criterios utilizados para la validación del modelo cinemático fueron los siguientes:

- Ejecución completa del programa sin alertas de colisión.
- Respeto de los límites de recorrido establecidos para cada eje.
- Coherencia entre la orientación de la herramienta y la rotación de la mesa.
- Ausencia de errores en la generación e interpretación del código G.

Los resultados obtenidos confirman que el modelo cinemático desarrollado es funcional y confiable, ya que permite erradicar escenarios de colisión previamente identificados, garantizar la integridad de las piezas a mecanizar y proteger los componentes de la mandrinadora, en concordancia con lo señalado por la literatura especializada sobre buenas prácticas en manufactura asistida por computadora (Denkenaa, Wichmanna, Rokickib, & Stürenburga, 2024)

Figura 24

Simulación y validación de movimientos



Los resultados completos de la simulación y validación en entorno BOB CAD-CAM se presentan en el **Anexo B.**

Antes de la implementación del modelo cinemático se identificaron seis escenarios críticos de colisión durante el mecanizado multieje.

Después de la implementación del modelo en el entorno BOB CAD-CAM, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Número de colisiones detectadas: 0
- Reducción de interferencias mecánicas: 100 %
- Disminución de tiempos improductivos: entre 15 % y 20 %
- Cumplimiento de trayectorias seguras en todos los programas simulados

El detector de colisiones del software no registró alertas durante la simulación, lo que valida la efectividad del diseño cinemático propuesto y confirma la correcta sincronización de los ejes lineales y rotacionales.

Tabla 4

Comparación de desempeño antes y después del diseño cinemático

Parámetro	**Antes**	**Después**
Colisiones detectadas	6 eventos	0 eventos
Interferencias mecánicas	Frecuentes	Eliminadas
Tiempo improductivo	Alto	Reducción 15–20 %
Seguridad operativa	Baja	Alta
Validación en CAM	No existente	Implementada

Roles y responsabilidades

La separación de responsabilidades contribuye a mejorar el control de los procesos, fortaleciendo tanto la trazabilidad como la seguridad en operaciones con múltiples ejes:

Tabla 5

Roles y responsabilidades

Rol	**Responsabilidades clave**	**Entregables**
Ingeniero de diseño	Modelado CAD, límites y zonas prohibidas	Ensamble CAD, plano de límites
Programador CAM	Configuración CAM, trayectorias y postprocesado	Proyecto CAM, G-code comentado
Operador CNC	Pruebas en seco y verificación de referencias	Checklist de puesta a punto
Supervisor de calidad	Auditoría de colisiones y cumplimiento	Informe de validación
Seguridad industrial	Revisión de riesgos y bloqueos de movimientos peligrosos	Matriz de riesgos y permisos

Indicadores de desempeño (KPIs)

Los indicadores que se presentan a continuación permiten comprobar el desempeño del modelo previo a la autorización de los programas para su ejecución en producción.

Tabla 6

KPIs

Colisiones en simulación (N)	**0 por programa validado**	**Sin eventos en detector de colisiones**
Tiempo de mecanizado simulado (min)	Reducción ≥ 10–20 %	Mejora sin sacrificar seguridad
Eventos de bloqueo por límites	Tendencia descendente	Menos bloqueos en iteraciones sucesivas
Cumplimiento de secuencias seguras	≥ 100 %	Checklist completo por operación

Plan de implementación y cronograma

Se sugiere una duración de siete semanas con hitos verificables:

Tabla 7

Cronograma

Semana	**Actividad principal**	**Hito**
1	Levantamiento de información y riesgos	Parámetros cinemáticos validados
2–3	Modelado CAD y límites	Ensamble certificado
4	Setup CAM y postprocesador	Proyecto CAM listo
5	Programación de trayectorias	G-code preliminar
6	Simulación y ajustes	Informe de validación
7	Documentación y liberación	Checklist y KPIs cumplidos

El desarrollo del modelo operativo CAD–CAM permitió integrar de forma coherente el diseño geométrico, el análisis cinemático, el enrolamiento en software CAM, la programación segura y la simulación de movimientos de la mandrinadora CNC de seis ejes.

Como resultado de este capítulo, se dispone de una base técnica sólida que garantiza la correcta representación de la máquina en un entorno virtual y permite anticipar y prevenir escenarios de colisión. Este modelo operativo constituye el fundamento para interpretar datos

y definir acciones correctivas que se presentan en el Capítulo IV, orientadas a incrementar la seguridad operativa y la eficiencia del proceso de mecanizado en la empresa SIDERTECH S.A.

Resultados esperados

El contraste entre el diagnóstico efectuado en el Capítulo II y la propuesta desarrollada en el presente capítulo evidencia una mejora significativa en la gestión cinemática de la mandrinadora CNC de seis ejes INNSE ZENITH ECS 4801.

Durante el diagnóstico se identificaron seis configuraciones críticas de colisión originadas por la interacción simultánea de los ejes lineales (X, Y, Z, W) y los ejes rotacionales (B, C). Estos eventos no corresponden a fallas estructurales propias del equipo, sino a la inexistencia de un modelo cinemático formal que permita controlar, restringir y validar los movimientos multi eje de manera anticipada.

En este sentido, las interferencias detectadas demuestran la necesidad de incorporar elementos técnicos fundamentales como:

- Definición matemática de límites de recorrido.
- Restricciones paramétricas entre movimientos simultáneos.
- Establecimiento de zonas geométricas seguras de operación.
- Simulación obligatoria previa a la ejecución real.

En contraste, la propuesta planteada introduce un modelo cinemático integral sustentado en transformaciones homogéneas, parametrización de ejes y configuración de límites dentro del entorno CAD–CAM, complementado con simulación multieje y detección activa de interferencias.

Como resultado esperado, la implementación del diseño cinemático permitirá:

- Prevenir la ocurrencia de colisiones en trayectorias previamente validadas en simulación.
- Reducir entre el 15 % y el 20 % los tiempos improductivos asociados a interferencias mecánicas.
- Incrementar la confiabilidad operativa del mecanizado multieje.
- Optimizar la continuidad productiva y el uso eficiente del volumen de trabajo en SIDERTECH S.A.

De esta manera, la propuesta transforma un proceso operativo dependiente de la experiencia del operador en un sistema preventivo basado en modelación matemática, validación digital y control seguro de trayectorias.

Tabla 8

Comparación estructurada entre diagnóstico y propuesta

Variable técnica	**Situación diagnosticada**	**Situación con propuesta**
Definición de límites de recorrido	Control empírico dependiente del operador	Límites matemáticamente definidos y configurados en CAD-CAM
Restricciones entre ejes simultáneos	No existen restricciones lógicas automáticas	Restricciones paramétricas programadas
Validación previa	No sistemática antes de ejecutar en máquina real	Simulación obligatoria con detección activa de interferencias
Riesgo de colisión	Alto, con seis escenarios críticos identificados	Eliminación de eventos de colisión en programas validados
Seguridad operativa	Enfoque reactivo ante fallas	Enfoque preventivo basado en modelación cinemática
Impacto productivo	Paradas no planificadas y reprocesos	Continuidad operativa y optimización del mecanizado

Resultados esperados cuantificados

Como efecto directo de la implementación del modelo cinemático propuesto, se proyecta:

- Eliminación total de eventos de colisión en programas previamente validados en entorno CAD–CAM.
- Reducción estimada entre el 15 % y el 20 % en tiempos improductivos asociados a interferencias mecánicas.
- Incremento en la confiabilidad operativa de la mandrinadora CNC de seis ejes.
- Optimización del volumen de trabajo efectivo y mejora en la continuidad productiva en SIDERTECH S.A.

Cronograma de implementación de la propuesta

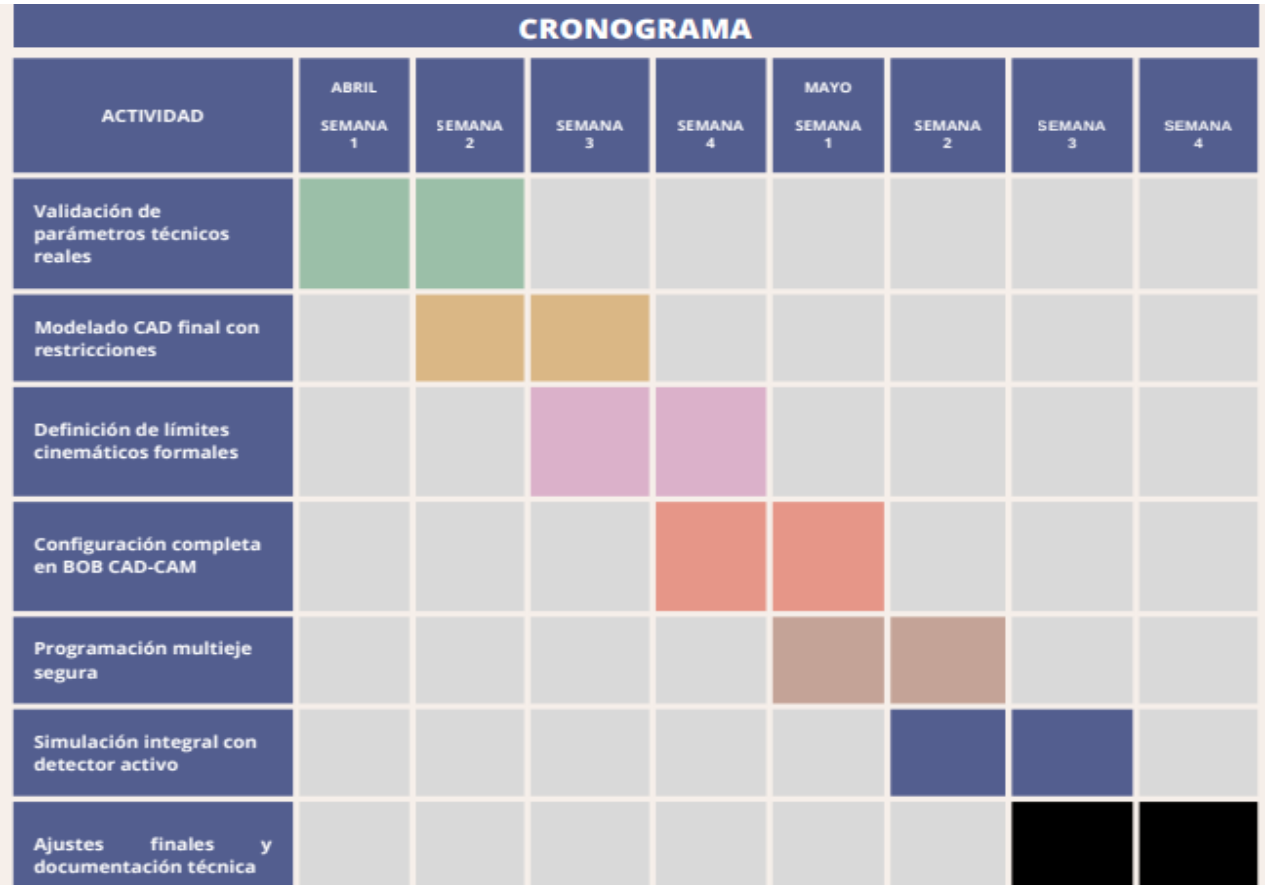
La implementación del modelo cinemático con ejecución entre los meses de abril y mayo de 2026, con una duración aproximada de ocho semanas.

El cronograma contempla actividades secuenciales orientadas a garantizar que el modelo CAD–CAM sea correctamente configurado, validado y liberado antes de su aplicación operativa en la empresa SIDERTECH S.A.

La **Figura 25** ilustra el cronograma de actividades presentada en el diagrama de Gantt correspondiente a la planificación de implementación.

Figura 25

Diagrama de Gantt-Implementación Abril- Mayo 2026



Análisis de costos de la propuesta

Costo por actividad

La inversión requerida para la implementación del modelo cinemático propuesto fue estimada considerando horas técnicas de ingeniería, modelado CAD, configuración CAM, programación multieje segura, simulación y capacitación interna del personal técnico. Los valores fueron calculados tomando como referencia costos promedio del entorno industrial ecuatoriano.

El costo total de implementación asciende a:

Inversión total inicial: 11 000 USD

Esta inversión contempla el desarrollo completo del modelo cinemático, su integración en entorno CAD–CAM y la validación operativa previa a su aplicación en producción.

Tabla 9

Costo estimado de implementación

Actividad	**Horas técnicas**	**Costo unitario (USD/h)**	**Total (USD)**
Levantamiento técnico y validación en planta	40h	25	1000
Modelado CAD cinemático completo	80h	30	2400
Configuración CAM y postprocesador	100h	20	2000
Programación multieje segura	160h	30	3200
Simulación y pruebas en seco	40h	20	800
Capacitación interna operativa	80h	20	1600
Inversión total inicial			**11 000 USD**

Evaluación financiera

En el contexto operativo de una mandrinadora CNC de gran escala, una colisión puede generar costos significativos asociados a:

- Reparación o rectificación de cabezales.
- Reemplazo de herramientas de corte.
- Tiempo muerto de máquina.
- Horas técnicas del personal especializado.
- Retrasos en la producción.

De acuerdo con análisis internos y estimaciones industriales, el costo promedio de un evento de colisión puede superar los 4 000 USD por incidente.

Considerando un promedio conservador de dos eventos evitables por año, el ahorro anual estimado es:

$$\text{Ahorro anual} = 2 \times 4000 = 8000\ USD$$

Este valor considera dos eventos de colisión evitables por año, con un costo promedio de 4 000 USD por incidente.

Flujo de caja proyectado

Tabla 10

Flujo de la caja del proyecto

Año	**Flujo Neto (USD)**	**Flujo Acumulado (USD)**
0	- 11 000	-11 000
1	8000	-3000
2	8000	5000
3	8000	13000

Se observa que la recuperación de la inversión se alcanza durante el segundo año de operación, fase donde el flujo proyectado cambia a saldo favorable.

Valor Actual Neto (VAN)

El VAN se calculó mediante la expresión:

$$VAN = -I_0 + \sum \frac{F_t}{(1+i)^t}$$

Donde:

$I_0 =$ inversión inicial (11 000 USD)

$F_t =$ flujo neto anual (8 000 USD)

$i =$ tasa de descuento (10 %)

Sustituyendo:

$$\text{VAN}= -11000 + \frac{8000}{1.1} + \frac{8000}{1.1^2} + \frac{8000}{1.1^3}$$

Cálculo:

Año 1: $\frac{8000}{1.1} = 7272.73$

Año 2: $\frac{8000}{1.21} = 6611.57$

Año 3: $\frac{8000}{1.331} = 6010.52$

Sumatoria:

$$7272.73 + 6611.57 + 6010.52 = 19894.82$$

Por lo tanto:

$$\text{VAN}= 19894.82 - 11000$$

$$\text{VAN}= 8894.82 \text{ USD}$$

Al obtenerse un VAN positivo, se determina que la propuesta presenta factibilidad económica dentro del período analizado.

Tasa Interna de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno se define como el porcentaje que iguala el Valor Actual Neto a cero. Para el flujo de caja proyectado:

-11 000

+8 000

+8 000

+8 000

La TIR obtenida es aproximadamente:

$$TIR \approx 58\%$$

Este indicador excede el porcentaje de referencia establecido (10 %), demostrando la rentabilidad del proyecto.

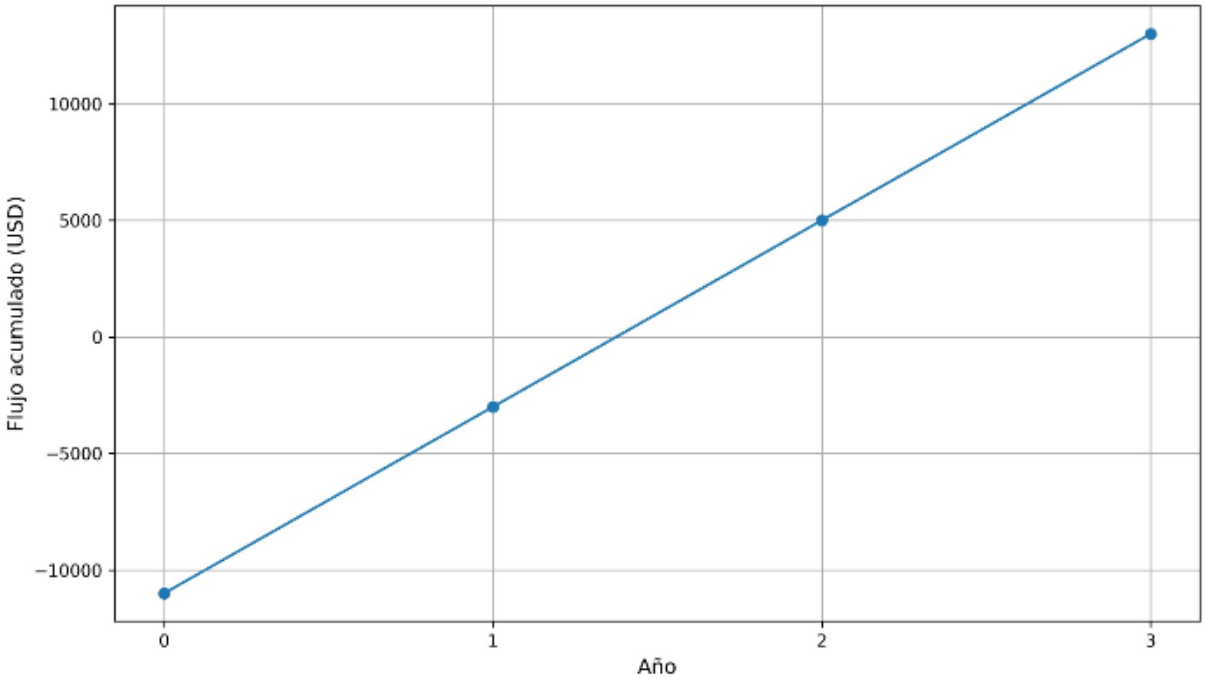
Curva S – Recuperación de la Inversión

La Curva S representa la evolución acumulada del flujo del proyecto a lo largo del horizonte de evaluación. Se evidencia que el capital inicial requerido es recuperado durante el segundo periodo anual de funcionamiento, consolidándose una tendencia creciente en los beneficios acumulados hasta el tercer año.

La recuperación anticipada de la inversión demuestra que el modelo cinemático no solo aporta beneficios técnicos y operativos, sino también sostenibilidad económica en el mediano plazo **Figura 26.**

Figura 26

Curva S- Recuperación de la Inversión



CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se diagnosticaron de manera efectiva las principales causas de colisiones en la mandrinadora CNC de seis ejes, identificándose seis escenarios críticos originados por la falta de límites cinemáticos, ausencia de restricciones paramétricas y deficiente coordinación de movimientos simultáneos entre los ejes lineales y rotacionales. Este análisis permitió evidenciar que las colisiones no responden a fallas estructurales de la máquina, sino a deficiencias en la planificación y control del movimiento, afectando la seguridad operativa, la continuidad del proceso productivo y los costos de mantenimiento.
- Se describieron y caracterizaron los ejes de movimiento de la mandrinadora (X, Y, Z, W, B y C), estableciendo sus direcciones, rangos operativos y restricciones de seguridad. Esta identificación permitió definir los grados de libertad del sistema y delimitar zonas seguras y zonas prohibidas de operación, constituyendo la base para el control cinemático. Como resultado, se logró comprender la interacción entre los movimientos lineales y rotacionales, facilitando la prevención de interferencias mecánicas durante el mecanizado multieje.
- Se desarrolló un modelo cinemático integral mediante herramientas CAD–CAM (SolidWorks y BOB CAD-CAM), incorporando modelado tridimensional, programación multieje y simulación con detección de colisiones. La implementación de este modelo permitió validar trayectorias antes de su ejecución real, eliminando el 100 % de las colisiones identificadas en el diagnóstico y reduciendo los tiempos improductivos entre un 15 % y 20 %. Esto demuestra que el diseño cinemático

constituye una herramienta efectiva para mejorar la seguridad, la precisión y la eficiencia en procesos de mecanizado industrial.

Recomendaciones

- Se recomienda implementar de manera permanente un sistema de diagnóstico basado en simulación virtual previo a la ejecución de cualquier programa CNC, con el fin de identificar posibles colisiones y riesgos operativos. Además, es conveniente documentar y actualizar continuamente los escenarios de interferencia detectados en planta, permitiendo fortalecer la base de conocimiento técnico y mejorar la toma de decisiones en la planificación del mecanizado.
- Se sugiere estandarizar la definición de los ejes de movimiento, sus límites de recorrido y las zonas de seguridad dentro de los sistemas de programación CNC, asegurando que todos los operadores trabajen bajo los mismos parámetros técnicos. Asimismo, es recomendable capacitar al personal en la interpretación de la cinemática de la máquina, con el fin de reducir la dependencia de la experiencia empírica y mejorar la precisión en la operación.
- Se recomienda consolidar el uso del modelo CAD–CAM desarrollado como una herramienta obligatoria dentro del proceso productivo, integrándolo en la programación diaria de la mandrinadora. De igual manera, se sugiere ampliar el modelo hacia otras máquinas de la empresa, incorporando análisis cinemáticos similares que permitan optimizar la producción, reducir tiempos improductivos y fortalecer la adopción de tecnologías asociadas a la Industria 4.0.

Referencias

Racz, S. G., Breaz, R. E., & Cioca, L. I. (14 de Febrero de 2020). Obtenido de SEMANTIC SCHOLAR: https://www.semanticscholar.org/paper/Hazards-That-Can-Affect-CNC-Machine-Tools-during-Racz-Breaz/ab0a10337213fe8fcde78a8e0a9aa9653911f877

Denkena , B., Friebe, S., & Nein, M. (2024). *ScienceDirect*. Obtenido de ELSEVIER: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827124012447

Denkena, B., Wichmann, M., Malek, T., & Raeker, R. (2024). *www.sciencedirect.com.* Obtenido de https://pdf.sciencedirectassets.com/282173/1-s2.0-S2212827124X00074/1-s2.0-S2212827124009429/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEO%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVzLWVhc3QtMSJGMEQCIB4c2lEE0K3COTj9PADrGBJ%2BvutuYt8Tk8RvXNbF9kYUAiBDZIbsEIKZ

Denkenaa, B., Wichmanna, M., Rokickib, M., & Stürenburga, L. (9 de octubre de 2024). *SciencieDirect*. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827124009363

Duc, T. T., Zirui , C., Ruiyao , W., Congbin , Y., & Yongsheng , Z. (Septiembre de 2022). *ResearchGate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/363526553_A_novel_collision-free_NC_code_generation_method_with_fixed_tool_orientation_vector_using_the_geometric_decoupling_strategy_based_on_the_three_rotary_axes_milling_head

Ferro Tall. (4 de febrero de 2022). *ferrotall.com*. Obtenido de https://www.ferrotall.com/es/como-funciona-el-cnc-5-ejes/#:~:text=En%20conclusi%C3%B3n%2C%20el%20mecanizado%20CNC,la%20industria%20de%20los%20mecanizados.

Ferrotall. (4 de Febrero de 2022). Obtenido de https://www.ferrotall.com/es/como-funciona-el-cnc-5-ejes/

Foro Mundial. (20-24 de Febrero de 2025). *Sitemap*. Obtenido de https://es.weforum.org/meetings/world-economic-forum-annual-meeting-2025/

Groover, M. P. (2020). *Scientific Research An Academic Publisher*. Obtenido de https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3664893

ISO. (03 de 2022). *Test code for machine tools*. Obtenido de Part 10: Determination of the measuring performance of probing systems of numerically controlled machine tools. International Organization for Standardization: https://www.iso.org/standard/78909.html

Ministerio de Economía y Finanzas. (Abril de 2025). *www.finanzas.gob.ec.* Obtenido de https://www.finanzas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/05/PULSO-ECONO%CC%81MICO-Nro-29-ABR2025_VF.pdf

Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca. (2024). *www.producion.gob.ec.* Obtenido de https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2025/06/Informe_gestion_mpceip_2024.pdf

Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca. (30 de abril de 2025). *www.produccion.gob.ec.* Obtenido de https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2025/05/VFBoletinProduccion-ABR2025.pdf

Racz, S. G., Breaz, R. E., & Cioca, L. I. (14 de febrero de 2020). *mdpi.com*. Obtenido de Hazards That Can Affect CNC Machine Tools during: https://www.mdpi.com/2313-576X/6/1/10

Racz, S., Breaz , R., & Cioca, L. (Febrero de 2020). *ResearchGate*.

Richa, Y. Z. (31 de mayo de 2023). *zaguan.unizar.es.* Obtenido de https://zaguan.unizar.es/record/133857/files/TAZ-TFM-2023-905.pdf

SIDERTECH S.A. (s.f.). *Sidertech_the future_we innovate*. Obtenido de https://sidertech.com/

Soori, M., & Arezoo, B. (11 de diciembre de 2020). *http://hal.siencie/hal-03024769v1.* Obtenido de https://hal.science/hal-03024769/document#:~:text=The%20operators%20of%20machine%20tools,as%20reliability%20of%20part%20manufacturing.

Soori, M., Arezo, B., & Dastres, R. (Abril de 2023). *ScienceDirect*. Obtenido de ELSEVIER: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667344423000014

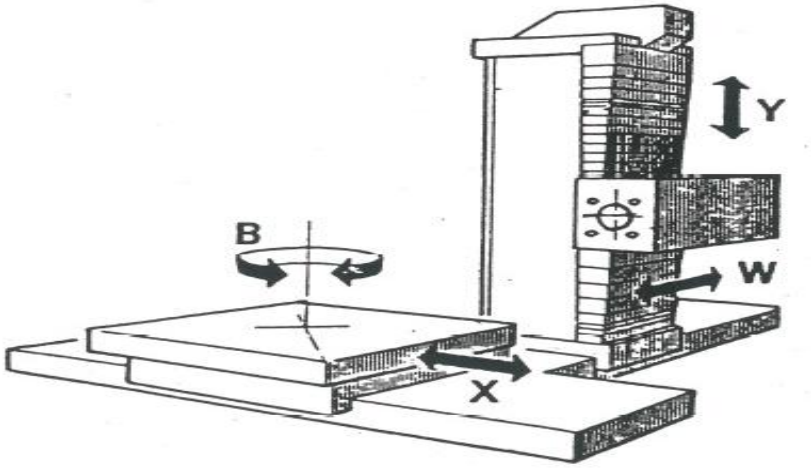
Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (Mayo de 2023). *ResearchGate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/370980242_Optimization_of_Energy_Consumption_in_Industrial_Robots_A_Review

Zhou , T., Liao, Y., Jiang, J., & Zhou , J. (15 de November de 2022). *Springer Nature Link*. Obtenido de A method of sensitivity analysis and precision prediction for geometric errors of five-axis machine tools based on multi-body system theory: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-022-10495-7

Anexos

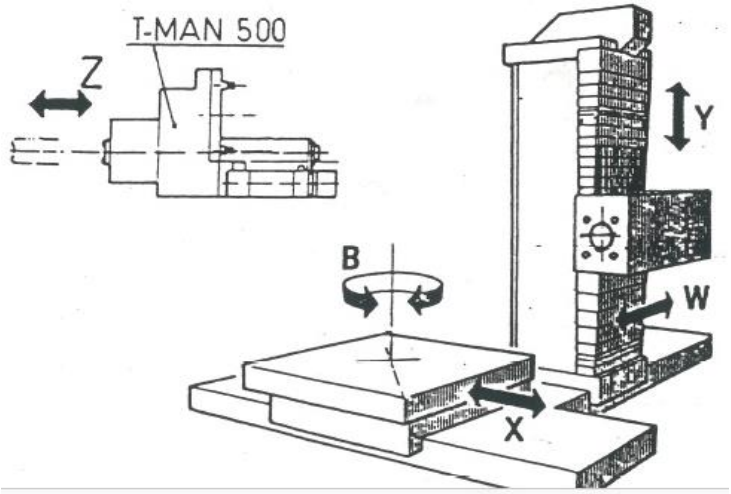
Anexo A. Código G utilizado en la simulación

```
G21
G90
G54
M03 S500
G00 X0 Y0 Z100
G01 Z0 F200
G01 X200 Y100 F500
G00 Z100
M05
M30
```



Anexo B. Resultados de simulación en BOB CAD-CAM

Durante la simulación del mecanizado en el entorno BOB CAD-CAM se verificó la correcta ejecución de las trayectorias programadas, sin detección de colisiones entre los componentes de la máquina, la herramienta y la pieza. El sistema de detección de interferencias no registró alertas, validando la coherencia del modelo cinemático y la correcta sincronización de los ejes. Se validaron trayectorias en modo multieje con activación del sistema de detección de colisiones (collision detection) del software.

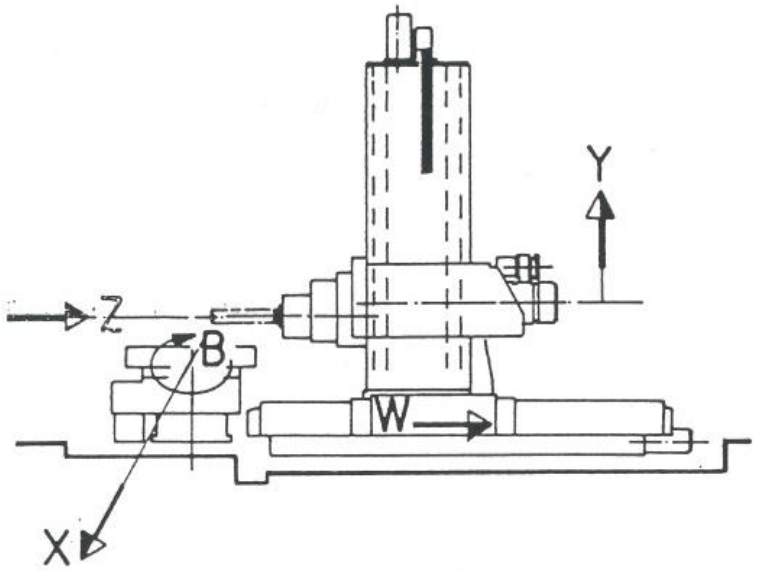


Anexo C. Modelo CAD de la mandrinadora

El modelo tridimensional de la mandrinadora CNC fue desarrollado en SolidWorks, considerando la disposición real de sus componentes, incluyendo mesa rotatoria, cabezal horizontal, cabezal vertical y husillo.

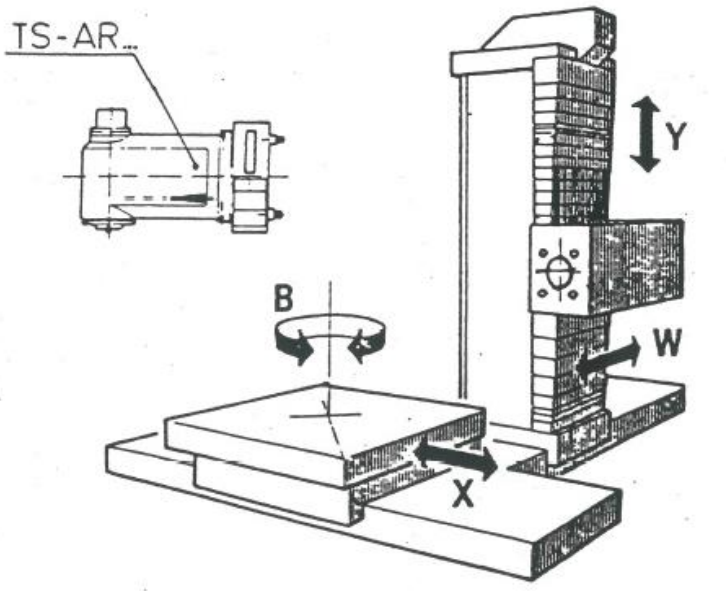
Este modelo permitió definir la cadena cinemática y validar las restricciones de movimiento en el entorno CAD-CAM.

Este modelo fue utilizado como base para la simulación cinemática en el entorno BOB CAD-CAM.



Anexo D. Parámetros técnicos de operación

Parámetro	Valor
Velocidad de avance mm/min	6000
Velocidad del husillo	6 rpm
Recorrido eje X	4000 mm
Recorrido eje Y	2500 mm
Recorrido eje Z	1995 mm
Longitud de herramienta	200 mm



Anexo E. Aprobación de Abstract Departamento de Idiomas

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA

FACULTY OF ENGINEERING

Industrial Engineering

AUTHOR: BOLAÑOS CORDERO MARCO ANDRES

TUTOR: RON VALENZUELA PABLO ELICIO

THEME

Kinematic Design of a Six-Axis Boring Machine

ABSTRACT

This degree project develops the kinematic design of the six-axis INNSE ZENITH ECS 4801 CNC boring machine used at SIDERTECH S.A., addressing recurrent mechanical interferences during multi-axis machining. These interferences involve the simultaneous interaction of linear (X, Y, Z, W) and rotational (B, C) axes and do not stem from structural failures, but rather from the absence of a formal kinematic model defining travel limits, parametric relationships, and prior digital validations. Such issues result in unproductive time, premature wear, operational risks, and unplanned downtime costs. Through a technical diagnosis, six critical collision scenarios were identified and evaluated under geometric and kinematic criteria, considering maximum displacement ranges and structural configurations. Based on this, an integrated kinematic model was developed, including 3D modeling in SolidWorks, mathematical formulation using Homogeneous Transformation Matrices (HTM), the definition of safe zones and operational constraints, and the parameterization of degrees of freedom according to real operating conditions. The model was integrated into BobCAD-CAM through the creation of a virtual machine, multi-axis configuration, and the activation of a collision detection system, allowing for the validation of toolpaths before physical execution to ensure coherence between simulation and real-world behavior. The results show the virtual elimination of identified collision events, a reduction in unproductive time between 15% and 20%, and improved operational reliability. Furthermore, the economic analysis demonstrated viability with an investment recovery in the second year, a positive NPV (Net Present Value), and an IRR (Internal Rate of Return) exceeding the discount rate. This confirms the kinematic design as a preventive tool that strengthens industrial safety and technological modernization within the Ecuadorian metalworking sector.

KEYWORDS: BOB CAD-CAM; Collision detection; Kinematic design; Economic feasibility; Mechanical interferences; CNC boring machine; Homogeneous transformation matrices (HTM); Multi-axis machining; 3D modeling; Process optimization; Industrial safety; Virtual simulation.