



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE MECATRÓNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CUARTO Y QUINTO EJE PARA UNA
FRESADORA CNC DE JOYERÍA.

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: DAVID ENRIQUE ARMIJOS CAMPOS
DAVID MAURICIO UZCHA MERCHÁN

TUTOR: ING. CHRISTIAN MAURICIO COBOS MALDONADO, PhD.

Cuenca / Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, David Enrique Armijos Campos con documento de identificación N° 0150322311 y David Mauricio Uzhca Merchán con documento de identificación N° 0105650956; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 20 de marzo del 2024

Atentamente,



David Enrique Armijos Campos
0150322311



David Mauricio Uzhca Merchán
0105650956

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, David Enrique Armijos Campos con documento de identificación N° 0150322311 y David Mauricio Uzhca Merchán con documento de identificación N° 0105650956, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: "Diseño y construcción del cuarto y quinto eje para una fresadora CNC de joyería.", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 20 de marzo del 2024

Atentamente,



David Enrique Armijos Campos
0150322311



David Mauricio Uzhca Merchán
0105650956

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Christian Mauricio Cobos Maldonado con documento de identificación N° 0104015938, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CUARTO Y QUINTO EJE PARA UNA FRESADORA CNC DE JOYERÍA., realizado por David Enrique Armijos Campos con documento de identificación N° 0150322311 y David Mauricio Uzhca Merchán con documento de identificación N° 0105650956, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 20 de marzo del 2024

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, reading "Christian Cobos", is written over a horizontal line. The signature is stylized and somewhat scribbled.

Ing. Christian Mauricio Cobos Maldonado, PhD
0104015938

Dedicatoria

David Enrique

El presente proyecto de titulación está dedicado a mi familia por ser los primeros en darme el soporte para seguir adelante en mi desarrollo profesional, a mis amigos y compañeros que me brindaron toda la ayuda que hacía falta para culminar cada peldaño de esta etapa de mi vida. A mi abuelo, quien ha sido como un padre para mí al ayudarme en diferentes circunstancias cuando a los demás se les hacía complicado y impulsarme a aseguir aprendiendo y levantarme después de cada caída.

Y quiero realizar una dedicatoria especial a mi mamá, quien por sobre todas las cosas fue y es la primera en darme el empuje necesario para superar cada obstáculo que me ha sido presentado durante estos años, sus palabras, sus esfuerzos y sacrificios me han ayudado a llegar a este punto importante de mi vida.

David Mauricio

Dedico este trabajo a quienes me han acompañado en el proceso de su desarrollo, quienes han sido mi soporte, mi fuente de energía, mi acompañamiento, orientación e inspiración para culminar y salir adelante en cada etapa. A quienes me brindaron su confianza, me permitieron tener la oportunidad de demostrar mi capacidad y a quienes me ofrecieron su apoyo, porque valoro su aporte en mi preparación.

A mis abuelitos: Alejandro, Margarita, Gonzalo y María, porque me enseñaron el poder del amor de Dios. A mis padres, mis tíos, mis primos y mi gata Ahri, quienes me comprenden y alientan a continuar siempre.

A David, Cristina y Kevin, mis amigos dentro y fuera de la universidad, mis compañeros de trabajo, y quienes han sido parte esencial en la reralización del proyecto.

Agradecimientos

David Enrique

Quiero agradecer a mi familia por estar dispuestos a brindarme la ayuda suficiente para cumplir con éxito cada desafío que se me ha sido presentado, a mis amigos y compañeros de universidad que me dieron el espacio para convivir y aprender con ellos los diferentes temas que abarca esta ingeniería.

Y un agradecimiento para nuestro tutor que se dio el tiempo de ayudarnos para que este trabajo cumpla con las expectativas de quienes lean este trabajo y se encuentre a la altura que exige esta universidad.

David Mauricio

Debo agradecer primero a Dios, por permitirme tener esta experiencia de vida, por haberme dado una madre y un padre amorosos, y una familia que me ha apoyado y alentado constantemente, son quienes velaron por mi salud y bienestar con calidez.

A los docentes de la universidad, quienes dedicaron su tiempo a enseñar y resolver mis inquietudes.

Este documento fue realizado enteramente en L^AT_EX

Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación	I
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana	II
Certificado de dirección del trabajo de titulación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	XII
Abstract	XIII
1. Introducción	1
2. Problema	1
2.1. Antecedentes	1
2.2. Descripción del problema	2
2.3. Importancia y alcances	3
2.4. Delimitación	4
2.4.1. Espacial o geográfica	4
2.4.2. Temporal	4
2.5. Problema General	4
2.6. Problemas Específicos	4
3. Justificación	5
4. Objetivos	5
4.1. Objetivo General	5
4.2. Objetivos específicos	5
5. Hipótesis	6
5.1. Hipótesis General	6
5.2. Hipótesis Específicas	6

6. Marco Teórico	6
6.1. Método artesanal por fundición por cera perdida	6
6.1.1. Árbol de fundición	7
6.1.2. Proceso de la empresa para obtener joyas	7
6.2. Control Numérico Computarizado	8
6.3. Código G	8
6.4. Máquinas CNC	10
6.5. Fresadora CNC	10
6.5.1. Aplicaciones de fresadoras CNC	14
6.6. Fresadoras CNC para joyería	14
6.7. Ejes complementarios	15
6.7.1. Cuarto eje	15
6.7.2. Quinto eje	18
6.7.3. Reductor de velocidad planetario	19
6.8. Software CAD	20
6.8.1. AutoCAD	20
6.9. Software CAM	21
6.9.1. Fusion 360	21
6.9.2. DeskProto	22
7. Marco metodológico	23
7.1. Descripción de la fresadora CNC	23
7.1.1. Identificación de subsistemas	23
7.1.2. Circuito de eléctrico.	27
7.2. Diseño de cuarto eje	28
7.2.1. Diseño de detalle	28
7.2.2. Conexiones	28
7.3. Diseño de quinto eje	29
7.3.1. Diseño de detalle	29
7.3.2. Conexiones	29
7.3.3. Caja reductora	30
7.3.4. Simulaciones	30
7.4. Cotización de componentes	32
7.5. Construcción e implementación	35

8. Conclusiones	38
9. Recomendaciones	39
Referencias	41
ANEXOS	42

Lista de Tablas

- 1. Grupos de código G 9
- 2. Componentes electrónicos 33
- 3. Componentes mecánicos 34
- 4. Componentes mecánicos 35
- 5. Matriz de consistencia 43
- 6. Matriz de consistencia 44
- 7. Variable dependiente 45

Lista de Figuras

1.	Modelo de referencia.	3
2.	Árbol de fundición	7
3.	Fresadora CNC	11
9.	Fresadora CNC de cuatro ejes para joyería modelo ZG-3030.	14
10.	Fresadora CNC de cuatro ejes para joyería modelo FK-30.	15
11.	Cuarto eje de fresadora CNC	16
12.	Mecanismo de cuarto eje por levas	16
13.	Mecanismo cicloidal	17
14.	Mecanismo tonillo-corona	17
15.	Cuarto eje acoplado con un motor	18
16.	CNC de 5 ejes	18
17.	Modelado del quinto eje de una fresadora CNC.	19
18.	Reductor de velocidad planetario.	20
19.	Interfaz de AutoCAD	21
20.	Interfaz de Fusion 360	22
21.	Interfaz de DeskProto	23
22.	Subsistemas de un dispositivo mecatrónico.	24
23.	Molde diseñado en DeskProto.	24
24.	Motor paso a paso de la fresadora CL4-001.	25
25.	Sensor óptico.	25
26.	Driver DM542.	26
27.	Placa de interfaz para CNC de cinco ejes Mach3.	26
28.	Circuito de fresadora CNC de cinco ejes.	27
29.	Conexiones del cuarto eje.	28
30.	Conexiones del quinto eje.	29
31.	Reductora comercial.	30
32.	Criterio de Von Mises.	31
33.	Desplazamiento total.	32
34.	Caja de control de fresadora.	36
35.	Fresadora de cinco ejes construida.	37
36.	Funcionamiento de la fresadora.	38

Resumen

Este proyecto de tesis propone el diseño y la construcción del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC empleada para mecanizar moldes de cera en una joyería de la ciudad de Cuenca, con el propósito de optimizar el proceso de fabricación de los moldes al poder reducir el tiempo de intervención humana en su elaboración .

Se han consultado diferentes fuentes bibliográficas para comprender el proceso de elaboración de los moldes de cera de manera artesanal, el funcionamiento de las máquinas CNC y los mecanismos que componen los ejes complementarios de estos equipos. De esta manera, se realizó el diseño del cuarto y quinto eje utilizando software CAD/CAM para la simulación de las estructuras, movimientos de los ejes y para la elaboración de los planos de las piezas de la fresadora.

Una vez verificado en la simulación que la fresadora con los cinco ejes funciona correctamente, se elaboró la proforma con los materiales y componentes a adquirir para la construcción.

Se realizaron pruebas con la fresadora ya construida para verificar que cumpla con los requisitos de funcionamiento y garantizar la compatibilidad del software utilizado con la tarjeta de control implementada.

Palabras clave: CNC, Código G, Fresadora, Eje rotacional, Optimización, Joyería

Abstract

This thesis project proposes the design and construction of the fourth and fifth axis of a CNC milling machine used to machine wax molds in a jewelry store in the city of Cuenca, with the purpose of optimizing the mold manufacturing process by being able to reduce the time of human intervention in its preparation.

Different bibliographical sources have been consulted to understand the process of making wax molds by hand, the operation of CNC machines and the mechanisms that make up the complementary axes of this equipment. In this way, the design of the fourth and fifth axis was carried out using CAD/CAM software for the simulation of the structures, movements of the axis and for the preparation of the plans of the milling machine parts.

Once it was verified in the simulation that the milling machine with the five axes works correctly, the proforma was prepared with the materials and components to be acquired for the construction.

Tests were carried out with the already built milling machine to verify that it meets the operating requirements and guarantee the compatibility of the software used with the implemented control card.

Keywords: CNC, G-Code, Milling Machine, Rotary Axis, Optimization, Jewelry

1. Introducción

La producción de piezas de joyería de alta calidad requiere procesos de fabricación óptimos, eficientes y precisos. Sin embargo, el proceso de producción actual de una empresa de joyería, que utiliza una fresadora CNC de cuatro ejes, tiene limitaciones para producir varios moldes con detalles finos. En este sentido, se requiere un proceso manual adicional en la línea de producción para separar y pulir los moldes del material en bruto, lo cual da como resultado tiempos irregulares de producción y por lo tanto pérdidas económicas.

Para solucionar esta dificultad, este proyecto tiene como objetivo diseñar y construir una nueva fresadora CNC de cinco ejes (X, Y, Z, B, C) para la fabricación de moldes de cera para joyería. El equipo dispondrá de un espacio de trabajo de 100mm x 100mm x 50mm, e integrará dos ejes rotativos con los que se puede cambiar de rotación del eje B al eje C. De esta manera, el nuevo equipo permitirá producir diseños tridimensionales complejos con eficiencia y precisión. Del mismo modo, podrá mecanizar moldes de diferentes tamaños donde se considera un diámetro de 20mm a 50mm de apertura para la sujeción del material en bruto. Esta propiedad mejora la calidad de tener flexibilidad en los procesos de producción.

2. Problema

2.1. Antecedentes

Desde la revolución industrial se ha mejorado la calidad de la manufactura mediante el análisis de los sistemas y procesos, hasta llegar a los tiempos contemporáneos en donde se derrallora la automatización junto a la industria 4.0. Gracias al Control Numérico Computarizado (CNC) y al diseño asistido por computadora (CAD) se pudo dar paso a la la manufactura asistida por computadora (CAM). Incluso, permitió a los sistemas de manufactura flexible mejorar sus métodos de fabricación, señalan (Torres Arenas y Hoyos Burbano, 2019).

En la actualidad, se da uso al Control Numérico Computarizado para fabricar diseños mecánicos en diversos materiales con precisión y exactitud. En la ciudad de Cuenca, con el desarrollo comercial de las máquinas CNC para el corte y grabado en diversos materiales, ha aumentado la disponibilidad de los elementos y dispositivos para su construcción y mantenimiento. Este echo podría explicar la razón por la cual algunos negocios particulares han puesto su atención en la innovación de sus procesos productivos particulares y han realizado inversiones en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías para optimizar su proceso productivo.

Dentro de este contexto, ya que el desarrollo de la industria actualmente presenta un alto costo de inversión inicial, la tecnología CNC, ha provocado que ingenieros y estudiantes de ingeniería se centren en el desarrollo de sistemas CNC con la finalidad de modernizar sistemas existentes o desarrollar accesorios que satisfagan necesidades de manera rentable. Tal es el caso de la propuesta de (Acuña, Bustillos, y Coque, 2009), que trataron de implementar un eje rotativo “A” sobre el eje “X” y un eje rotativo “C” sobre el eje “Z”.

Por un lado, está el caso de (Caluña Caluña, 2018) quienes crearon un manual para la operación básica y mantenimiento de tres máquinas utilizadas en la Facultad de Mecánica de la ESPOCH, entre ellas, la fresadora Router CNC 5 ejes HY-3040 China Mini. Este manual se diseñó para guiar los procesos de mecanizado en piezas utilizando el software Siemens NX y la programación en Match 3 para la fresadora CNC. Algunas marcas de fabricantes de este tipo de máquinas de 5 ejes son: Haas de (Haas Automation, 2023), DMG MORI de (*5-Axis Milling - DMG MORI*, 2023), GF Machining Solutions de (*5-Axis Milling*, 2021), Mazak de (USA, 2023) y MC Machinery Systems de (*Precision Milling | MC Machinery Systems*, 2023), entre otros. De esta manera, la información de la construcción del equipo será útil al proponer un mantenimiento predictivo.

2.2. Descripción del problema

En la actualidad, la empresa CleonTec brinda un equipo industrial para el proceso de producción de moldes de joyería, el cual se trata de una máquina CNC de cuatro ejes (X, Y, Z, A), con recorridos de trabajo de 150mm x 150mm en "X" y "Y" respectivamente, siendo este modelo limitado para la fabricación de moldes que utilizan en la joyería.

El presente proyecto tiene la finalidad de diseñar y construir un dispositivo mecatrónico en el cual estén integrados los ejes rotacionales (A y C) para la maquina CNC existente. El cual aportara con dos grados de libertad en la maquina CNC, permitiéndole a esta ser más versátil al momento de la fabricación de moldes de cera para joyería.

Figura 1

Modelo 3D de referencia.



Nota: Modelo 3D de referencia. Molde mecanizado en cera para joyería por el modelo CL4-001, (CleonTec, 2022).

2.3. Importancia y alcances

Frente a la demanda de piezas de joyería de alta calidad, el diseño e implementación de la estación de fresado CNC de 5 ejes permitirá optimizar el proceso de fabricación gracias a los mecanismos axiales en los ejes X y Y de la máquina, lo que le permitirá mover la fresa en un área de 145 mm x 145 mm x 50 mm más los dos grados de libertad adicionales.

La máquina tendrá la capacidad de realizar el mecanizado de moldes de diferentes tamaños gracias a que el quinto eje tendrá un diámetro máximo de 50 mm de apertura, tomando en cuenta que los cilindros de cera para joyería tienen un diámetro de 27 mm.

Si bien la máquina CNC y el dispositivo que se plantea adicionar será utilizado para mecanizar parafina, se puede de igual manera evaluar la respuesta mecánica del dispositivo para mecanizar materiales como aluminio, bronce, etc.

2.4. Delimitación

El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

2.4.1. Espacial o geográfica

El proyecto se puede aplicar para la manufactura de moldes de cera para joyas en pequeños y medianos negocios con espacio en planta limitado a un área de 60cm x 70cm y una altura de 70 cm.

2.4.2. Temporal

El periodo de tiempo estimado para la elaboración de este proyecto se estableció en 400 horas, durante el periodo académico marzo-agosto de 2023 en la Universidad Politécnica Salesiana.

2.5. Problema General

¿Cuál es el diseño idóneo para la construcción del mecanismo que permita el funcionamiento del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para el proceso de mecanizado de moldes de cera para joyería?

2.6. Problemas Específicos

- ¿Es posible identificar las restricciones para el diseño del mecanismo que permita el funcionamiento del cuarto y quinto de una fresadora CNC para optimizar el proceso de mecanizado de moldes de cera para joyería?
- ¿Es posible proponer el diseño mecánico y de control del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el proceso de mecanizado de moldes de cera para joyería?
- ¿Es viable realizar el análisis de costos unitarios del diseño del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el proceso de mecanizado de moldes de cera para joyería?
- ¿Es factible construir el diseño del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el proceso de mecanizado de moldes de cera para joyería?

- ¿Es posible implementar el diseño del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el proceso de mecanizado de moldes de cera para joyería?

3. Justificación

El presente proyecto surgió en respuesta a la necesidad de optimizar el proceso de mecanizado de moldes de cera en una joyería en la ciudad de Cuenca, ya que se requiere un mecanizado más complejo y preciso, y no basta con la máquina que se utiliza en la actualidad que solo posee cuatro ejes, además de que se necesita de intervención humana para pulir detalles más finos en los moldes. La implementación de un quinto eje mejorará los procesos de mecanizado gracias a que se habilita un grado más de libertad para que los moldes sean totalmente realizados por la máquina.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

- Diseñar e implementar el cuarto y quinto eje en una fresadora CNC para el proceso de mecanizado de moldes de cera para joyería.

4.2. Objetivos específicos

- Identificar las restricciones mecánicas para el diseño del mecanismo que permita el funcionamiento del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el proceso de mecanizado de moldes de cera en una joyería.
- Proponer el diseño mecánico y de control del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el proceso de mecanizado de moldes de cera para joyería.
- Realizar el análisis de costos unitarios del diseño del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el proceso de mecanizado de moldes de cera para joyería.
- Construir el diseño del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el proceso de mecanizado de moldes de cera para joyería.

5. Hipótesis

5.1. Hipótesis General

- Es posible diseñar y construir el cuarto y quinto eje en la fresadora CNC para optimizar el proceso de mecanizado de moldes de cera para joyería.

5.2. Hipótesis Específicas

- Se identificarán los requerimientos para definir las restricciones del diseño y control del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el proceso de mecanizado de moldes de cera para joyería.
- Se propondrá el diseño mecánico y de control del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el proceso de mecanizado de moldes de cera para joyería.
- Se realizará el análisis de costos unitarios del diseño del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el proceso de mecanizado de moldes de cera para joyería.
- Se construirá el diseño del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el proceso de mecanizado de moldes de cera para joyería.

6. Marco Teórico

6.1. Método artesanal por fundición por cera perdida

Según (Vega y Mesa, 2019) es una técnica mediante la cual, el diseño de un prototipo hecho a mano en cera se recubre con material cerámico, cuando esta se solidifica, adopta la geometría exacta de la pieza deseada. Posteriormente, el molde es ingresado en un horno con la finalidad de derretir la cera, al extraerla se deja una cavidad con la forma deseada, por la cual se vierte el metal fundido para obtener la pieza de joyería. Los materiales utilizados en esta técnica son:

- Poliamidas: polímero empleado en la ingeniería por sus propiedades físicas y mecánicas: como dureza, resistencia a sustancias químicas, baja resistencia a la fricción, maquinabilidad, bajo peso y estabilidad térmica entre 10° C hasta 100° C. (Carvajal Hernández y

Cocha Ajila, 2018). Se considera aplicar los parámetros de corte recomendados, con lo cual se determina el tipo de rugosidad se busca, la cantidad de material a remover, el tipo de cuchilla a utilizar.

- Cera: es un compuesto de poliamidas, parafinas y resinas, que ha tenido diversas aplicaciones a lo largo de la historia hasta la actualidad en diversas joyerías, en la elaboración de velas, alumbrado, protectores, conservantes, impermeabilizantes, cartuchos, cremas, construcción de moldes, entre otras aplicaciones (Askeland, Fulay, y Wright, 2017).

6.1.1. Árbol de fundición

Es un sistema para alimentar varios moldes mediante una entrada donde se vierte el material fundido a través de bebederos como el de la figura 2, ayudando a que el material fluya hacia las diferentes cavidades del molde. (Vega y Mesa, 2019).

Figura 2

Árbol de fundición.



Nota: El proceso del revestimiento en la fundición a la cera perdida ayuda a obtener el molde en material metálico. (Vega y Mesa, 2019).

6.1.2. Proceso de la empresa para obtener joyas

La empresa utiliza materiales como el grilón para realizar los moldes, tomando en cuenta que ya disponen de una fresadora CNC de cuatro ejes, la empresa sigue el siguiente proceso para obtener las piezas de joyería:

- Diseño del modelo: la empresa utiliza el software DeskProto para realizar los diseños de los moldes que desean fabricar.

- Preparación del material: el operario coloca un bloque de cera en la fresadora CNC y lo fija correctamente.
- Configuración de parámetros de corte: mediante el software LinuxCNC se configura los parámetros como la velocidad de corte, profundidad de corte, entre otros.
- Fresado: La máquina comienza a mecanizar la pieza en el bloque de cera.
- Acabado: se retira la pieza de la máquina para realizar manualmente los detalles y pulido final del molde para posteriormente enfriarlo para solidificarlo.
- Fundición: con el molde obtenido, se aplica la fundición por cera perdida para conseguir la pieza en metal.
- Acabado final: se realizan trabajos de acabado sobre la joya como pulido, incrustación de piedras preciosas, y detalles finales.

6.2. Control Numérico Computarizado

El Control Numérico Computarizado (CNC) es la tecnología que permite dar movimiento a una máquina mediante softwares que contienen datos alfanuméricos, los cuales dan las instrucciones de movimiento ya sea de una pieza o de una herramienta, modificando otros parámetros como la velocidad de corte, profundidad, encendido o apagado de la herramienta, entre otras funciones. (Acuña, Gordón, y Núñez, 2015).

6.3. Código G

Según (Cajamarca Naula y Talbot Cuenca, 2017), es un lenguaje de programación de código numérico aplicado generalmente en la automatización de procesos. Se pueden definir: pausas, trayectorias complejas, velocidades, avances de la herramienta, ciclos repetitivos, etc, mediante líneas de código que se convierten en instrucciones para la máquina-herramienta.

Cada código G tiene un número de grupo. Cada grupo de códigos contiene comandos para un objetivo específico. Por ejemplo, el grupo 1 de códigos G, ordena movimientos punto a punto de los ejes de la máquina. El lenguaje está formado de manera que, cada grupo tiene un código G dominante, que son los que la máquina utiliza en cada grupo, salvo que se especifique otro código G del grupo. La tabla 1 enlista las funciones que cumple cada grupo que conforma

el código G. Es importante mencionar que existe software especializado para la generación de código G, los de libre acceso y los que requieren licencias de pago.

Tabla 1

Grupos de código G.

Número de grupo	Definición
00	No modal
01	Movimiento
02	Selección de plano
03	Modo distancia
05	Modo velocidad de avance
06	Unidades
07	Compensación de la herramienta de corte
08	Corrector de longitud de la herramienta
09	Ciclos fijos
10	Modo de retorno en ciclos fijos
11	Escala
12	Selección del sistema de coordenadas
15	Parada exacta
16	Rotación
23	Corrector de piezas dinámico

Nota: Dentro de cada grupo se encuentran comandos que cumplen acciones relacionadas con la función principal del grupo.

Este lenguaje de programación ha permitido que la tecnología se desarrolle y avance de forma continua. Su aplicación es necesaria para este tipo de proyectos que requieren de precisión y exactitud. Por otro lado, si bien el código nos ayuda a generar las trayectorias, estas se realizan en planos. La característica principal del presente proyecto es habilitar la rotación de los planos con código, mediante el diseño mecánico y un software que cambie el ángulo de inclinación, para posteriormente retornar al mecanizado de las trayectorias pre establecidas.

6.4. Máquinas CNC

Son máquinas controladas vía ordenador, mediante la técnica de control CNC, para mecanizar materiales como madera, foami, plástico, MDF, metal, entre otros. El surgimiento de estas máquinas ha optimizado el proceso técnico de creación tanto industrial como artística, además de ofrecer la automatización de secuencias de maquinaria que permiten la creación de piezas que manualmente no podrían hacerse o son muy complejas de realizar.

(Torres Arenas y Hoyos Burbano, 2019) nos recopila las ventajas del mecanizado CNC frente a los demás sistemas de manufactura, entre las que se encuentran:

- Ejecución de operaciones complejas.
- Alta precisión, mejora de a calidad.
- Disminución de desperdicios y tiempo de trabajo.
- Disminución de la intervención humana y posibles errores.
- Simplificación de la supervisión del producto.

6.5. Fresadora CNC

Máquina que utiliza herramientas de fresado para realizar el mecanizado en un elemento, desprendiendo tipo de herramienta en el husillo giratorio. Con la fresadora se puede obtener una variedad de formas, consiguiendo una buena calidad en los acabados superficiales con una alta tasa de remoción de viruta, (Amor Alcón y cols., 2018). La figura 3 muestra una fresadora CNC universal con la que se puede realizar diferentes tipos de mecanizado en una variedad de materiales sólidos, siendo de las máquinas más comunes que se encuentran en espacios industriales

Figura 3

Fresadora CNC.



Nota: Ejemplo de fresadora CNC universal, (Amor Alcón y cols., 2018).

Según (Peydró Rasero, Ivorra Martínez, Crespo Amorós, y Montava Jordà, 2022), los componentes de una máquina fresadora CNC vertical son los siguientes:

- Estructura: se refiere a la máquina en sí, logrando identificar el tamaño de la máquina, la robustez, velocidad, peso y accesorios que la conforman , así como los materiales en los que la fresadora puede trabajar.
- Superficie de trabajo: puede ser una mesa de vacío, con mordazas, mixta o con ventosas. En la superficie es donde se fija el material como se observa en la figura 4.

Figura 4

Fresadora de madera CNC de la marca Agri-Cutter.



Nota: Se puede observar que la superficie de trabajo supone toda el área horizontal destinada a apoyar la pieza de madera, (Agri-Cutter, 2023).

- Motores: estos componentes le darán movimiento a los ejes de la máquina, dentro de la tecnología CNC los motores comúnmente utilizados son los servos, los motores paso a paso como el de la figura 5 y los motores híbridos que combinan las propiedades de los dos anteriores.

Figura 5

Motor de paso NEMA.



Nota: Estos motores son utilizados para el movimiento de los ejes de la máquina, pueden variar según la potencia o torque requeridos, (Madekar, Nanaware, Phadtare, y Mane, 2016).

- Transmisión: es el modo en el que se transfiere la potencia de los motores a los ejes, bien por un sistema de correas, reductoras planetarias, husillo de bolas o cremallera como en la figura 6.

Figura 6

Sistema piñon-cremallera.



Nota: el mecanismo de cremallera transforma el movimiento rotacional de los motres en movimiento lineal, permitiendo así el desplazamiento de los ejes de la máquina, (Ramírez Guerrero, 2019).

- Mandril: es el motor que soporta y le da movimiento a la herramienta, puede variar en potencia dependiendo de la capacidad de corte que se necesite. La figura 7 muestra un mandril diseñado para mecanizados verticales.

Figura 7

Mandril MAS 403-BT40.

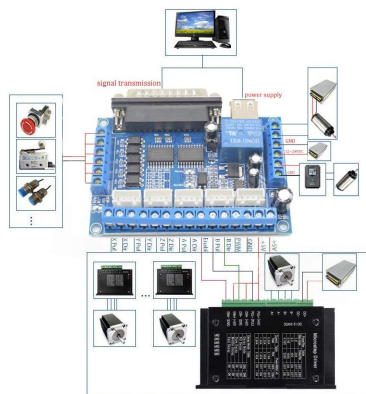


Nota: Existen diferentes modelos según la operación que debe realizar la herramienta, (de Mecanizado Vertical, 2016).

- Control: Puede ser mediante un mando; desde una PC, que a través de una tarjeta electrónica, actúa de intermediado entre el ordenador y la máquina; y por control numérico. En este desarrollo se hará uso de la interfaz de control de MACH3 cuyo esquema de conexión se lo puede observar en la figura 8.

Figura 8

Esquema de conexión de la interfaz MACH3.



Nota: Mach3 Interface Board 24V, (Placa de interfaz MACH3 con aislamiento y acopladores, 2023).

6.5.1. Aplicaciones de fresadoras CNC

La tecnología de fresado es utilizada en diferentes campos (Torres Arenas y Hoyos Burbano, 2019) como en joyería, para crear piezas de alta precisión y complejidad como anillos, pendientes de aro y collares, entre otros. Estas máquinas son capaces de crear formas y diseños que serían complicadas de lograr con herramientas manuales.

En el campo de la medicina las fresadoras son utilizadas para fabricar prótesis e implantes. Pueden fabricar implantes para huesos y articulaciones, como rodillas, caderas y hombros, así como prótesis para miembros superiores e inferiores.

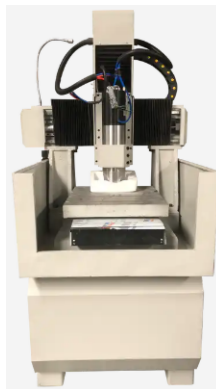
En el área de la fabricación de maquinaria, por ejemplo, las fresadoras son utilizadas en la fabricación de componentes para robots industriales, maquinaria de mecanizado y maquinaria de procesamiento.

6.6. Fresadoras CNC para joyería

Actualmente, existen fresadoras CNC que mecanizan piezas para joyería, ya sea en cera, cuero o jade, siendo su mayoría de cuatro ejes como el de la figura 9, ocasionando que el operario tenga que, o parar la máquina para reacomodar la pieza manualmente, o sacar la pieza de la máquina para pulir los detalles de manera manual.

Figura 9

Fresadora CNC de cuatro ejes para joyería modelo ZG-3030.



Nota: Este modelo está diseñado para el tallado en jade y grabado sobre placas de madera, (Alibaba, 2023).

Además, debido a que las piezas de joyería suelen tener un tamaño reducido, las máquinas

CNC diseñadas para estos trabajos son de un tamaño que optimiza el espacio de trabajo del operario como el de la figura 10

Figura 10

Fresadora CNC de cuatro ejes para joyería modelo FK-30.



Nota: Este modelo puede mecanizar en materiales como metales y ágata de Jade, (Alibaba, 2023).

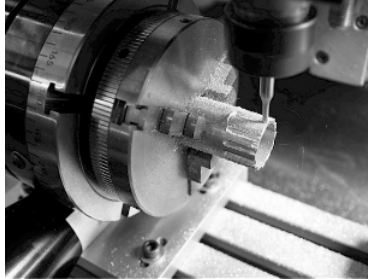
6.7. Ejes complementarios

6.7.1. Cuarto eje

Este mecanismo permite la rotación de la pieza a mecanizar en el eje B, en ambos sentidos de giro como el de la figura 11, dando a la herramienta la capacidad de mecanizar cuerpos de revolución y placas planas por ambos lados, y por ende, maquinando más variedad de geometrías.

Figura 11

Cuarto eje de fresadora CNC.



Nota: En este caso, la rotación del cuarto eje es horizontal, (Viau Najarro, 2010).

El cuarto eje de una fresadora puede tener diferentes mecanismos dependiendo del uso que se le de y del presupuesto disponible. (Viau Najarro, 2010) enlista los siguientes mecanismos que se pueden implementar:

- Leva: se utiliza cuando se requiere posicionar la pieza en intervalos de tiempo más pequeños. Este mecanismo constituye una leva en el eje de entrada y una rueda con seguidores en el eje de salida como se observa en la figura 12

Figura 12

Mecanismo de cuarto eje por levas.



Nota: La geometría de la leva controla las aceleraciones y desaceleraciones para tener una respuesta rápida de posicionamiento, (Viau Najarro, 2010).

- Mecanismo cicloidal: se compone un cojinete de montaje excéntrico, un disco cicloidal y un mecanismo de rotación en el eje de salida como se ve en la figura 13. Se utiliza cuando se requiere una gran capacidad de carga o evitar la emisión de ruido.

Figura 13

Mecanismo cicloidal.



Nota: Cuando el cojinete de montaje excéntrico gira con el eje de entrada, se transmite la fuerza de giro al disco cicloidal, (Torres Arenas y Hoyos Burbano, 2019).

- Transmisión de tornillo-corona: se compone de un tornillo sin fin y la corona, cuyos dientes se ajustan al tornillo como en la figura 14 para convertir el movimiento lineal a radial. Se utilizan cuando se dispone de espacios reducidos y se necesitan conectar ejes que se encuentran a 90° entre sí.

Figura 14

Mecanismo tornillo-corona.

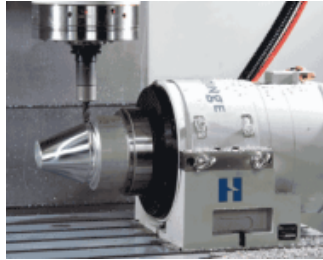


Nota: Los engranajes de este mecanismo ofrecen mayor torque, pero se dan pérdidas de potencia por la fricción entre el tornillo y la corona, (Torres Arenas y Hoyos Burbano, 2019).

- Sistema no mecánico: generalmente se refiere a los ejes que rotan mediante la acción de un motor de corriente directa como en la figura 15, evitando el juego que suele presentarse en los engranes y alcanzando altas velocidades de posicionamiento.

Figura 15

Cuarto eje acoplado con un motor.



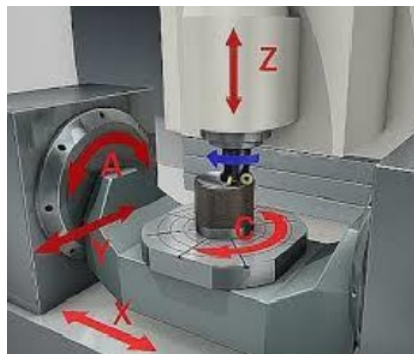
Nota: El motor del eje debe contar con una retroalimentación para verificar la posición, (Torres Arenas y Hoyos Burbano, 2019).

6.7.2. Quinto eje

Puede controlar el giro de la pieza sobre dos ejes, uno perpendicular al eje de la herramienta y otro paralelo a ella (como un mecanismo divisor y un plato giratorio en una fresadora vertical), (Torres Arenas y Hoyos Burbano, 2019). La figura 16 muestra una representación de las direcciones en las que se puede mover tanto la pieza como la herramienta en una fresadora CNC de cinco ejes.

Figura 16

CNC de 5 ejes.

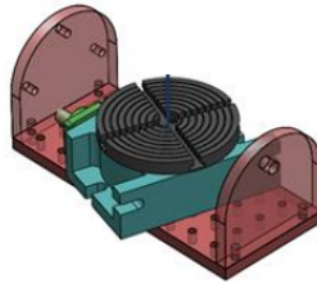


Nota: Representación de los cinco ejes en un fresadora CNC. (Torres Arenas y Hoyos Burbano, 2019).

En la figura 17 se puede observar el modelo simulado de un quinto eje de una fresadora vertical de la ESPE, donde el plato giratorio gris tiene el eje de giro alrededor del eje Z, (Acuña y cols., 2009). En esta caso, el mecanismo de este quinto eje utiliza una transmisión sin fin-corona:

Figura 17

Modelado del quinto eje de una fresadora CNC.



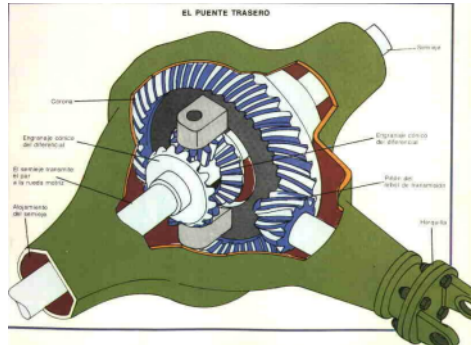
Nota: El quinto eje tiene una posición de trabajo horizontal, sin embargo esta orientación puede variar dependiendo de las configuraciones de los ejes, (Acuña y cols., 2009).

6.7.3. Reductor de velocidad planetario

(Cruz Agudelo, 2013) lo describe como un mecanismo que modifica la velocidad de entrada de un motor para obtener una velocidad de salida controlable, además de que puede ajustar las posiciones de los ejes y conseguir una transmisión de potencia deseada. Lo que diferencia este tipo de reductor de otros es que el sistema planetario de engranajes puede trabajar con uno o dos grados de libertad, por lo que es posible trabajar con dos velocidades de entrada para obtener una salida como se observa en la figura 18.

Figura 18

Reductor de velocidad planetario.



Nota: El sistema de engranajes planetarios ofrece un mayor torque, resistencia a sobrecargas y la capacidad para soportar cargas radiales y axiales, (Cruz Agudelo, 2013).

6.8. Software CAD

El software de Diseño Asistido por Computador (CAD) permite el dibujo y modelado de elementos. Del mismo modo, mediante el software de diseño se pueden elaborar hojas de procesos que se utilizan para registrar los pasos, herramientas y procesos necesarios para elaborar las piezas mecánicas. Dispone de herramientas para la simulación y el diseño ingenieril, permitiendo al usuario conocer la interacción entre los diferentes componentes de los modelos desde su concepción, (Arguello, 2013).

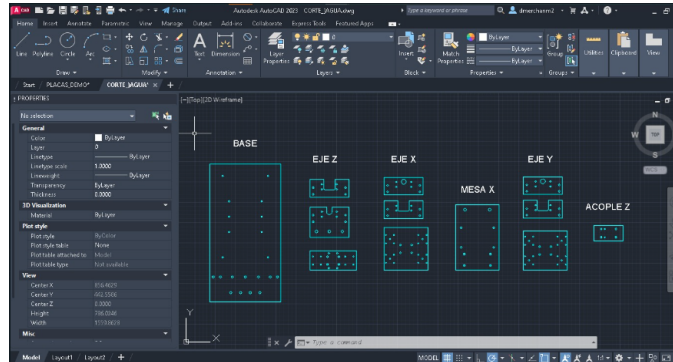
Para la elaboración de las hojas de procesos se requiere de la identificación de las partes a construir, tolerancias y acabados, la tecnología a usar, las herramientas, materiales y tiempos estimados en base a cálculos de velocidad y avance de corte, etc. Todo ello con el fin de manejar la mayor cantidad de información para la posterior construcción.

6.8.1. AutoCAD

Es un software que permite realizar dibujo técnico e industrial mediante un entorno gráfico que permite la creación de modelos tanto en 2D como en 3D. Es utilizado en diferentes campos, como la arquitectura, la ingeniería, la construcción, la fabricación, la cartografía, la electrónica, entre otros. (Perez Silva, 2016). Como se ve en la figura 19, en AutoCAD se pueden dibujar y acotar las placas que conforman la estructura de la fresadora de 5 ejes para posteriormente ser cortadas y ensambladas.

Figura 19

Interfaz de AutoCAD.



Nota: El entorno gráfico de AutoCAD permite realizar diferentes trazos para el dibujo de piezas mecánicas gracias a las herramientas que posee en la parte superior, (Autoría).

6.9. Software CAM

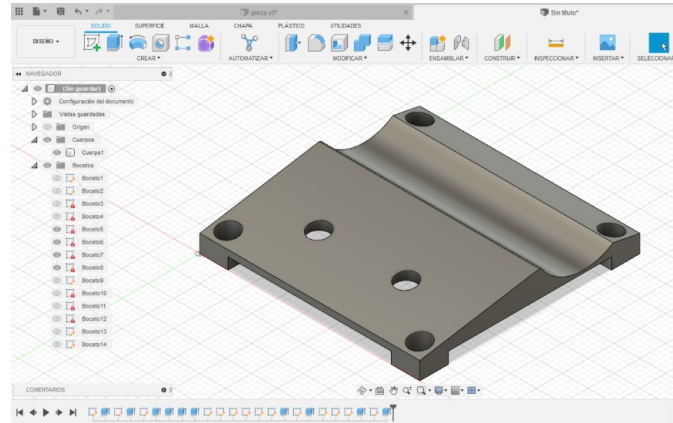
El software de manufactura asistida por computadora (CAM) permite diseñar y manufacturar prototipos o piezas para una posterior producción. Las aplicaciones CAM se basan en la programación de procesos de manufactura, como el mecanizado por CNC. El software CAM utiliza los archivos de los modelos creados en software CAD para generar las trayectorias en código G, con las que las herramientas de mecanizado le dan forma a la materia prima, (García Hernández, Kyratsis, Gella-Marín, Efkolidis, y Huertas-Talón, 2016).

6.9.1. Fusion 360

Es un software que permite crear diseños mecánicos e industriales, desde los planos con dos dimensiones hasta los sólidos con tres dimensiones como el de la figura 20. El programa permite la simulación de los modelos diseñados para observar la interacción entre estos, (Verma, 2018). Así como también se pueden realizar análisis de esfuerzo estático por el método de elementos finitos, donde se busca respaldar la solidez del diseño de las estructuras. Para el caso de la fresadora para joyería, Fusion permite analizar tanto al sistema del cuarto y quinto eje, como a los diseños de joyería que se deberán producir, los cuales en esta oportunidad son anillos. Por otro lado, el software posee la capacidad de conectarse a la red, con lo cual se puede trabajar en los diseños de forma remota. Con ello, se puede flexibilizar el trabajo del diseñador, y se puede facilitar la revisión y la corrección para la aprobación del diseño.

Figura 20

Interfaz de Fusion 360.



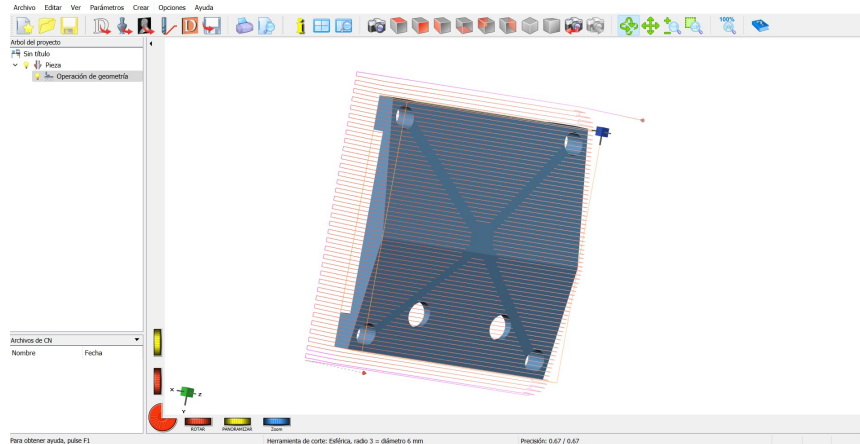
Nota: El entorno gráfico de Fusion 360 permite realizar modelados de mecanismos en 3D de manera detallada, (Autoría).

6.9.2. DeskProto

Es un software CAM para la programación y desarrollo de prototipos. El software requiere de el diseño en un archivo de formato STL, dando la posibilidad de programar el procesamiento con ejes rotativo que se pueden habilitar. Permite crear y visualizar las trayectorias de la herramienta para cualquier marca de fresadora de CNC de 3, 4 y 5 ejes como lo muestra la figura 21, (Vorkapić, Živanović, y Dimić, 2020).

Figura 21

Interfaz de DeskProto.



Nota: En el entorno gráfico de DeskProto se visualiza la trayectoria de la herramienta para generar el elemento, (Autoría).

7. Marco metodológico

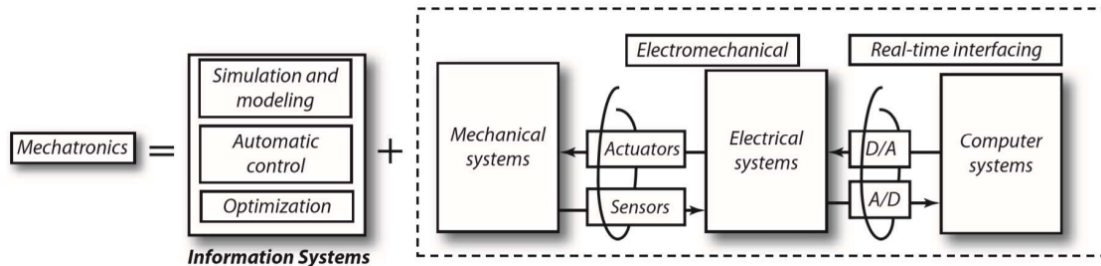
7.1. Descripción de la fresadora CNC

7.1.1. Identificación de subsistemas

La figura 22 muestra un esquema con los subsistemas que debe componer un dispositivo mecatrónico y como se relacionan entre ellos. Con base a esto, se describirán los componentes principales de la fresadora CNC de cinco ejes.

Figura 22

Subsistemas de un dispositivo mecatrónico.



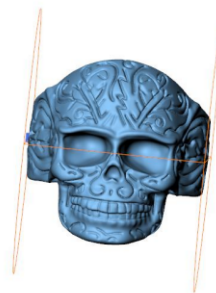
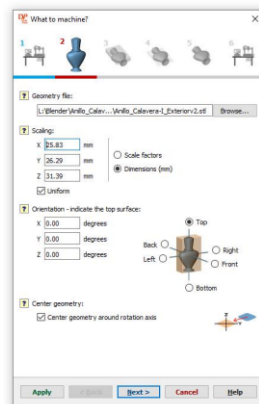
Nota: Un dispositivo mecatrónico se compone en los subsistemas: informático, mecánico, eléctrico y electrónico, (Shetty y Kolk, 2010).

Con base al esquema, se procede a identificar los subsistemas que tendrá la nueva fresadora CNC de cinco ejes:

- Subsistema de información: la fresadora se maneja con el software DeskProto, en el cual se diseñan los moldes de cera a mecanizar como el de la figura 23.

Figura 23

Molde diseñado en DeskProto.



Nota: DeskProto puede utilizarse para mecanizar piezas en fresadoras de hasta cinco ejes, (CleonTec, 2022).

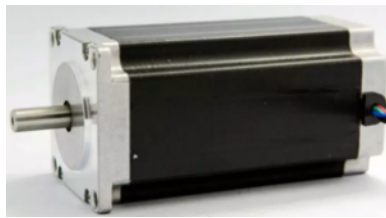
- Subsistema mecánico: La estructura de la máquina la componen las placas de acero,

perfiles de aluminio, rieles lineales, rodamientos lineales y placas de sujeción, estos elementos dan forma a los ejes X, Y y Z y al cuarto eje A.

- Actuadores: los actuadores de la máquina son los motores paso a paso de la marca RATTMMOTOR para el movimiento de los ejes como el de la figura 24 y el giro de la herramienta.

Figura 24

Motor paso a paso de la fresadora CL4-001.

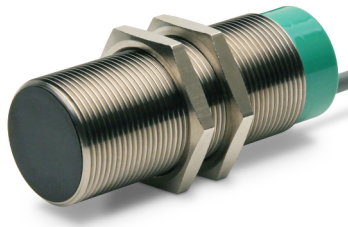


Nota: La función de este motor es el de desplazar los ejes de máquina, (CleonTec, 2022).

- Sensores: la máquina utiliza sensores ópticos como el de la figura 25 que actúan como fin carrera para detectar el momento en el que los ejes alcanzan su límite de desplazamiento.

Figura 25

Sensor óptico.

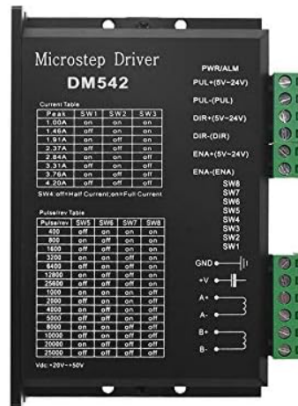


Nota: Los sensores evitan que los ejes X, Y y Z colisionen con la estructura de la máquina mientras están en movimiento, CleonTec (2022).

- DAC/ADC: La fresadora utiliza drivers DM542 como el de la figura ?? para el control de giro del motor en función de las instrucciones comandadas desde el ordenador.

Figura 26

Driver DM542.

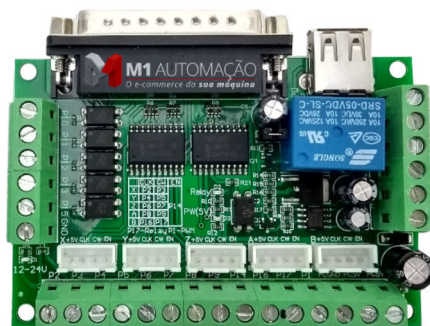


Nota: El driver DM542 controla el giro de los motores de los ejes X, Y,Z, A y B; esto para brindarle precisión a la herramienta para el mecanizado, (CleonTec, 2022).

- Retroalimentación: Este trabajo lo realiza la placa de interfaz para CNC de cinco ejes Mach3, una tarjeta electrónica que recibe, almacena y ejecuta las instrucciones de control de dirección, posición y velocidad para enviárselos a los drivers de los motores de los ejes y de la herramienta de sujeción. En la figura 27 se muestra el diseño de esta placa, el cual tiene compatibilidad con el software Mach3.

Figura 27

Placa de interfaz para CNC de cinco ejes Mach3.



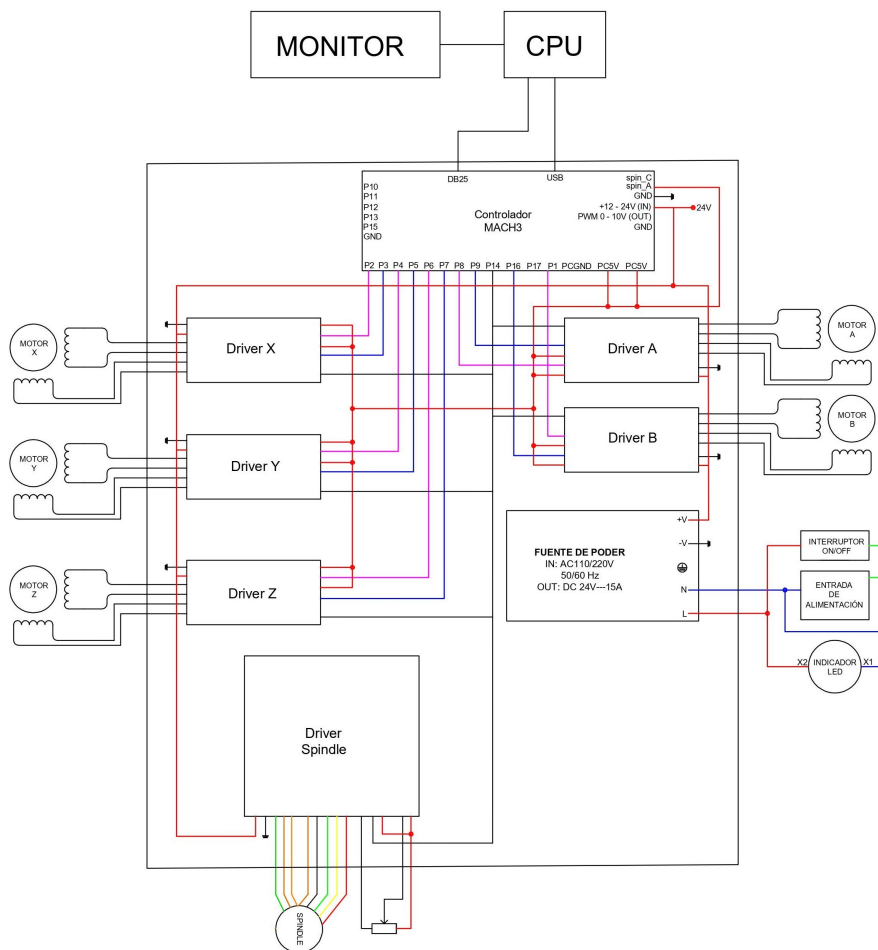
Nota: Esta placa de interfaz también permite el control de otros dispositivos de la fresadora como los sensores y el botón de seguridad. (M1AUTOMAÇÃO, 2023).

7.1.2. Circuito de eléctrico.

La figura 28 muestra el circuito eléctrico para el funcionamiento y control de la fresadora. Los componentes que se aprecian son: el ordenador, los motores Nema para los ejes, el spindle de la herramienta, el botón de seguridad, un driver DM542 para el control de cada eje y la placa de interfaz de control compatible con el software Mach3

Figura 28

Circuito de fresadora CNC de cinco ejes.



Nota: La placa de interfaz es el componente principal para el control de la fresadora, pues es el medio por el que se transmiten los datos de control entre el ordenador, drivers, herramienta y botón de seguridad, (Autoría).

7.2. Diseño de cuarto eje

7.2.1. Diseño de detalle

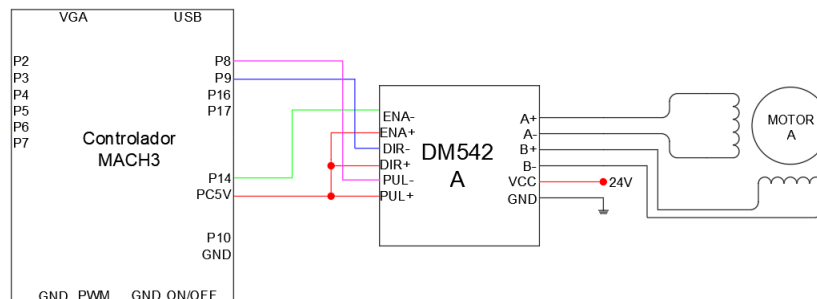
Se optó por acoplar un motor Nema 23 de 51 mm x 47 mm a una caja reductora 50:1 a fin de aumentar el torque de salida. La caja reductora tiene un mecanismo de engranes planetarios para realizar la relación 50:1, el modelo ideal para ocupar el menor espacio posible fue del tipo 14-50. El cuarto eje será sujetado mediante un soporte el cual unirá la caja reductora con un rodamiento de bolas para evitar la fricción en la rotación. Todo el mecanismo está fabricado en acero, acero inoxidable, aluminio y bronce y cada componente está unido con pernos Allen M3 y M5. El anexo (...) muestra el plano de montaje del cuarto eje.

7.2.2. Conexiones

El circuito del cuarto eje de la figura 33 muestra las conexiones entre el motor Nema, el driver DM542 y la placa de interfaz. El motor se conecta a los pines A+, A-, B+ y B- del driver para el control del movimiento, los pines de habilitación (ENA) detienen el motor o lo vuelve a activar según la señal lógica que reciba el driver, los pines de dirección (DIR) determinan el sentido de rotación del motor, ya sea en sentido horario O antihorario y los pines de pulsos (PUL) proporcionan señales de pulsos al motor para que este se mueva el número de pasos deseado.

Figura 29

Conexiones del cuarto eje.



Nota: Las partes positivas de los pines ENA, DIR y PUL del driver se conectan al pin de 5V de la placa de interfaz para el recibimiento de las señales de control,(Autoría).

7.3. Diseño de quinto eje

7.3.1. Diseño de detalle

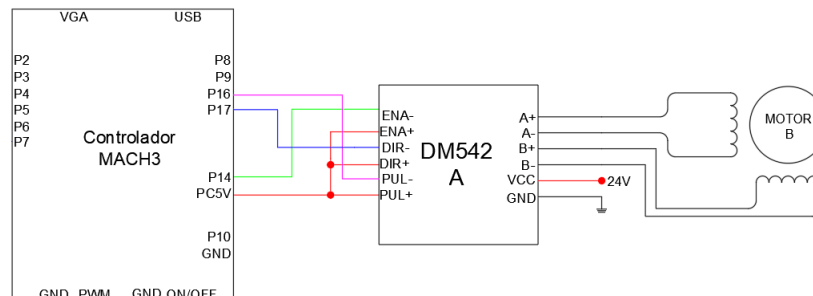
El mecanismo del quinto eje, ubicado en el extremo del cuarto eje, consiste en un sistema de engranes planetarios dispuestos en una relación 50:1 hacia la salida acoplado a un motor Nema 23 de 51 mm x 47 mm. De esta manera, mediante la configuración diseñada se puede hacer un cambio de rotación del quinto eje, del eje A al eje C con un giro de 90° en B mediante el cuarto eje. El soporte del quinto eje está diseñado para unir el acople del cuarto eje, el motor, la caja reductora y la herramienta de sujeción que sostiene la pieza a mecanizar. La fabricación del quinto eje fue realizado en acero, acero inoxidable, aluminio y bronce, donde todos los componentes están sujetos mediante pernos Allen M3 y M5. La herramienta sujeción se trata de una mordaza de cuatro garras autocentrantes. Se utilizó aluminio para el soporte de la herramienta y los acoples de la mordaza y herramienta; el cuerpo de la mordaza y las garras fueron fabricados en acero inoxidable y toda la estructura de la herramienta se encuentra unida mediante pernos Allen M3, M4 y M6. La lámina 3 en los anexos (...) muestran los planos del montaje del quinto eje y de la herramienta de sujeción respectivamente.

7.3.2. Conexiones

La figura 30 muestra el circuito para el quinto eje, el cual es similar al del cuarto eje, la diferencia está en los pines DIR- y PUL- del driver, los cuales están conectados a los pines P16 y 17 del controlador, el resto de conexiones se mantiene.

Figura 30

Conexiones del quinto eje.



Nota: Las partes positivas de los pines ENA, DIR y PUL del driver se conectan al pin de 5V de la placa de interfaz para el recibimiento de las señales de control, (Autoría).

7.3.3. Caja reductora

La relación de engranajes para el cuarto y quinto eje se consigue con una caja reductora 50:1, con esto se consigue una reducción de la velocidad a la vez que el torque aumenta 50 veces, permitiendo una mayor fuerza ante cargas aplicadas y un mejor control de velocidad de rotación. La figura 31 muestra un modelo comercial con el cual está basado nuestra configuración del cuarto y quinto eje para que cumpla con el espacio de trabajo requerido.

Figura 31

Reductora comercial.



Nota: Las partes positivas de los pines ENA, DIR y PUL del driver se conectan al pin de 5V de la placa de interfaz para el recibimiento de las señales de control, (Autoría).

Una vez identificado al proveedor del equipo, se desarrollan los diseños de las estructuras necesarias para su implementación, así como la preparación de los puertos y conexiones eléctricas de la máquina. La comunicación con el computador se la realiza mediante un puerto USB y un puerto DB25 para la transmisión serial. Debido a la configuración de cinco ejes, el control de velocidad del husillo se lo realiza mediante un potenciómetro.

7.3.4. Simulaciones

La simulación es una herramienta necesaria para el análisis de los diseños propuestos como solución viable a un problema. Para el caso, tres estructuras se identificaron para el funcionamiento deseado. Una placa de sujeción al carro principal en el eje Z, un soporte que sostenaga a la estructura del husillo de la fresadora y un acople entre el quinto eje y la herramienta de sujeción.

De las tres estructuras la que más podría sufrir deformaciones debido a un mal diseño es el soporte del husillo vertical. En este sentido, se empezó seleccionando al Aluminio como

material base y un diseño sin mucho detalle en forma de L invertida.

El criterio de Von Mises es un método ampliamente utilizado para estudiar la deformación de los materiales. Se basa en la idea de que la energía de deformación total de un material es proporcional al cuadrado de la tensión. Este criterio es particularmente útil para predecir la resistencia al rendimiento de los materiales, que es el punto en el que un material comienza a deformarse plásticamente.

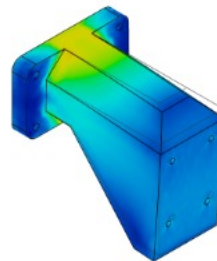
Figura 32

Criterio de Von Mises.

☐ Stress

☐ von Mises

[MPa] 0.001  0.198



Nota: La simulación muestra las partes que sufren mayor o menor deformación de acuerdo a la carga,(Autoría).

En el caso del proyecto se analizó al diseño del soporte de la estructura del eje Z ya que tiene que estar sujeto a una placa lateralmente y sujetar al husillo de la fresadora. En el informe de simulación realizado en Fusión 360 muestra que el diseño tiene una estructura que es prácticamente indeformable debido al material elegido, que es el aluminio y a la carga que no supera los 20N da como resultado un factor de seguridad superior a 15.

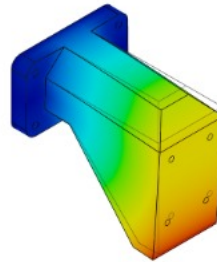
Figura 33

Desplazamiento total.

▣ Displacement

▣ Total

[mm] 0.00E-04  3.829E-04



Nota: La simulación muestra que el máximo desplazamiento para una carga de 20N es 3.829e-4mm,(Autoría).

El aluminio es un material ligero y fuerte que se utiliza comúnmente en aplicaciones aeroespaciales y automotrices. Tiene una alta relación resistencia-peso, por lo que es una opción ideal para estructuras que necesitan ser ligeras pero fuertes.

7.4. Cotización de componentes

Las tablas 2, 3 y 4 enlistan los elementos empleados en la construcción del modelo CL5 - 001 y su precio de referencia.

Tabla 2*Componentes electrónicos.*

Elemento	Cantidad	Precio unitario (\$)	Precio Total (\$)
Cable AWG18 tres núcleos	1.5m	2.23	3.35
Cable AWG22 cuatro núcleos	1.5m	2	3
Tubo termoretráctil 8mm	1	0.67	0.67
Driver DM542	3	35.71	107.13
Fuente de poder 24V 15A 360W	1	35.71	35.71
Switch conector macho	1	2.50	2.50
Cable de poder 1.2m AC	1	3.13	3.13
Conector aviador 4 pines hembra	4	0.67	2.68
Conector aviador 4 pines macho	4	0.67	2.68
Tarjeta de control MACH3	1	16.07	16.07
Conector aviador 3 pines hembra	2	0.67	1.34
Conector aviador 3 pines macho	2	0.67	1.34
Driver TB6600	1	14.73	14.73
Motor Nema 23	5	8.76	43.80
Conector 90-40	2	2.61	5.22
Conector 90-120	2	5	10
Motor spindle	1	92.86	92.86
Driver TB6660	2	9.69	19.38
Ventilador	1	24	24
Botón STOP	1	10	10
Luz piloto	1	6.79	6.79
Terminales #18	2	0.20	0.40
Rollo de cables rígido #18	100m	16	16
Conector aviador de 4 pines	5	1.25	6.25

Tabla 3*Componentes mecánicos.*

Elemento	Cantidad	Precio unitario (\$)	Precio Total (\$)
Tuerca inoxidable M5	12	0.08	0.96
Tuerca de seguridad M3	24	0.07	1.68
Tuerca inoxidable M3	2	0.1	0.2
Placa base	1	50	50
Soporte extremo BF10	3	10	30
Soporte extremo BK10	3	10	30
Soporte de motor	3	10	30
Husillo de bolas	3	135	405
Acople de rosca de bojas	1	5	5
Plato de acero para ejes	3	15	45
Plato de mesa de trabajo	1	15	15
Perfil de aluminio 2040	1	24	24
Riel lineal	1	93.10	93.10
Rodamiento lineal	10	17.86	178.60
Acople flexible tipo araña	3	3.57	10.71
Perfil de aluminio 40x120x120	1	8.43	8.43
Perfil de aluminio 40x120x360	1	25.28	25.28
Plato base de spindel	1	5	5
Soporte de spindle	1	50	50
Soporte laterales de aluminio	4	2	8
Tuerca rectangular M5x10	8	0.19	1.52
Tuerca de seguridad M5	12	0.08	0.96
Tuerca T insertable M3	30	0.13	3.90
Tuerca rectangular M6x10	2	0.18	0.36
Tuerca T insertable M8	7	0.22	1.54
Tuerca T rectangular WB M6	2	0.49	0.98
Perno Allen M5X55 cabeza plana	12	0.18	2.16
Perno Allen M5X20 cabeza plana	12	0.09	1.08
Perno Allen M5X8 cabeza plana	28	0.09	2.52

Tabla 4*Componentes mecánicos.*

Elemento	Cantidad	Precio unitario (\$)	Precio Total (\$)
Perno Allen M5X25 cabeza plana	36	0.09	3.24
Perno Allen M3x8	40	0.07	2.80
Perno Allen M3x10	34	0.07	2.38
Perno Allen M4x16	18	0.13	2.34
Perno Allen M8X10 cabeza redonda	15	0.22	3.30
Perno Allen M8X15 cabeza redonda	6	0.22	1.32
Perno Allen M8X15 cabeza hexagonal	8	0.20	1.60
Perno Allen M6x10	6	0.18	1.08
Perno Allen M6x15	2	0.18	0.36
Perno Allen M8x20	2	0.22	0.22
Caja reductora	2	7.38	14.76
Acople de aluminio roscado M14	1	80	80
Mordaza de 4 garras autoroscante	1	49.73	49.73
Arandela de seguridad M14	1	7.23	7.23
Broca de 3 caras	1	10.69	10.69
Canaletas y caja de control	1	50	50

7.5. Construcción e implementación

La figura 34 muestra la caja de control construida para colocar los componentes que ponen en funcionamiento de la fresadora. Dentro de la caja se encuentra: una fuente de poder, un ventilador, los drivers para los motores de los ejes y para el motor del spindle con sus respectivas conexiones, además de que en el exterior de la caja se introdujo un indicador led, el botón de para de emergencia y un potenciómetro para el control de velocidad del spindle.

Figura 34

Caja de control de fresadora.



Nota: Las conexiones de la máquina van acorde al esquemático del circuito mostrado anteriormente.

Para el funcionamiento de la máquina, fue necesario utilizar una computadora que disponga de un puerto paralelo, ya que la tarjeta de control utilizada también utiliza este puerto para el envío de datos. La figura 35 muestra la fresadora lista para probar su funcionamiento, la computadora a la que está conectada muestra el software donde se mandan las instrucciones del mecanizado

Figura 35

Fresadora de cinco ejes construida.

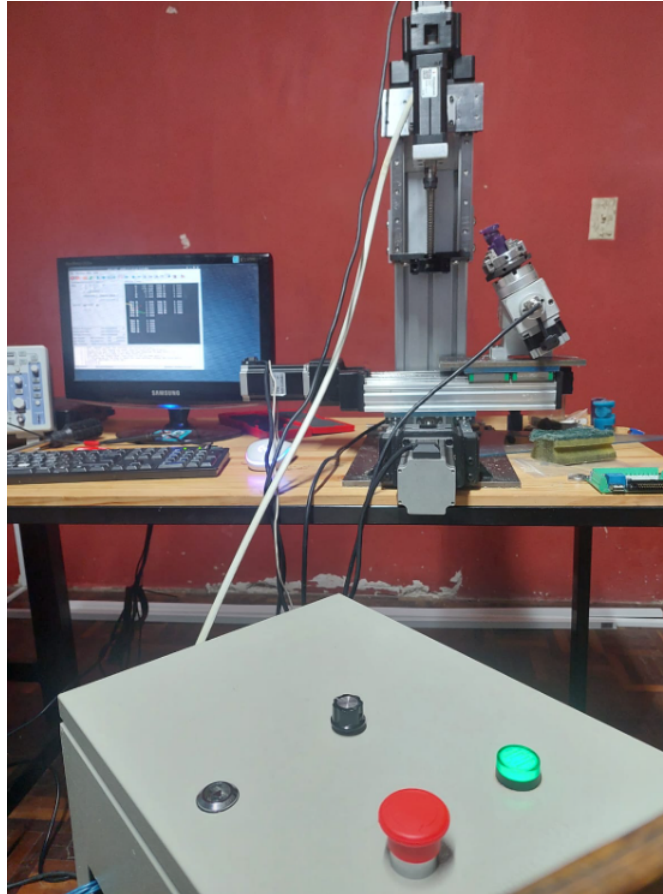


Nota: La fresadora funciona con el software Mach3 gracias a la compatibilidad con la tarjeta de control implementada.

La figura 36 muestra la máquina con una pieza de joyería. La fresadora funciona satisfactoriamente con el diseño del cuarto y quinto eje y la tarjeta de control compatible con Mach3 ofrece una respuesta rápida para el mecanizado.

Figura 36

Funcionamiento de la fresadora.



Nota: La Mach3 no permite el control de velocidad si se habilita el 5to eje, por lo que esta condición vuelve a la máquina semiautomática.

8. Conclusiones

Este proyecto es significativo porque abordará una limitación importante en el actual proceso de producción de piezas de joyería. De la misma manera, el desarrollo de esta nueva máquina ofrecerá una serie de beneficios a la industria de la joyería. En primer lugar, permitirá la producción de piezas de joyería de mayor calidad. En segundo lugar, reducirá el tiempo y el costo de producción aumentando la rentabilidad. En tercer lugar, aumentará la flexibilidad del proceso de producción.

Es importante identificar los subsistemas de la fresadora, pues la integración de estos contribuyen al funcionamiento de la máquina. El reconocimiento de estos subsistemas ofrece la comprensión de su estructura cómo interactúan entre sí, con ello se facilita la resolución de problemas de mantenimiento u operación para garantizar la eficiencia de la máquina.

Identificar los requisitos y requerimientos permitió establecer las restricciones que implicaba el diseño y construcción del cuarto y quinto eje de la fresadora CNC. Del mismo modo, se tuvo una noción más certera de cómo realizar el diseño de los ejes para que brinden un buen rendimiento y satisfagan las necesidades de los futuros usuarios.

El diseño mecánico del cuarto y quinto eje ofreció un espacio de trabajo suficiente para realizar modelos complejos. Con la placa de control adquirida, se puede manipular el movimiento del cuarto y quinto eje con precisión gracias a su compatibilidad con el software MACH3, el cual permite utilizarlo como interfaz principal de control de la fresadora. La implementación no resulta viable ya que requiere de una alta inversión, sin embargo las capacidades de la máquina aumenta la cantidad de aplicaciones de la misma.

9. Recomendaciones

Se recomienda definir correctamente las tolerancias para el ensamblaje de los componentes mecánicos, ya que un error de éstas implica volver a realizar la pieza, lo que conlleva a retrasos en la fabricación del elemento.

Se debe tomar en cuenta si existe compatibilidad entre el software de control de la fresadora y la tarjeta de control implementada, ya que así se garantiza una mejor transmisión de datos entre el ordenador y la fresadora, brindando un buen rendimiento en el movimiento de los ejes.

Referencias

- 5-axis milling*. (2021). GFMS. Descargado de <https://www.gfms.com/en-us/machines/milling/5-axis.html>
- 5-Axis Milling - DMG MORI*. (2023). Descargado 2023-02-03, de <https://en.dmgmori.com/products/machines/milling/5-axis-milling>
- Acuña, F., Bustillos, D., y Coque, K. (2009). Diseño y construcción de un prototipo de centro de mecanizado vertical cnc de 5 ejes para el laboratorio cnc de la espe extensión latacunga. *Extensión Latacunga*, 10.
- Acuña, F., Gordón, A., y Núñez, W. (2015). Diseño e implementación de un prototipo de torno fresado de control numérico computarizado.
- Amor Alcón, G., y cols. (2018). Evolución, análisis y estudio comparativo de las máquinas herramienta (torno y fresadora) a lo largo de la historia.
- Arguello, J. M. (2013). Desarrollo de la inteligencia espacial a partir de la utilización de software cad en la enseñanza de la geometría descriptiva. *Revista Educación en Ingeniería*, 8(15), 38–47.
- Askeland, D. R., Fulay, P. P., y Wright, W. J. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales*. CENGAGE learning.
- Cajamarca Naula, J. D., y Talbot Cuenca, R. X. (2017). *Diseño y construcción de un robot cartesiano controlado por código g para grabado a láser* (B.S. thesis). Universidad del Azuay.
- Caluña Caluña, A. I. (2018). *Manual de operaciones y mantenimiento de la máquina de electroerosión, la prensa excéntrica y la máquina fresadora router cnc 5 ejes hy-3040 china mini del taller de cad-cam de la facultad de mecánica*. (B.S. thesis). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Carvajal Hernández, C. F., y Cocha Ajila, J. J. (2018). *Estudio de la influencia de los parámetros de corte y geometría con herramienta de acero rápido en procesos de mecanizado en el polímero poliamida 6*. (B.S. thesis).
- CleonTec, D. U. (2022). Cleontec facebook.
- Cruz Agudelo, Y. E. (2013). Ingeniería inversa, desarrollo tecnológico y construcción de una carcasa de caja reductora.
- de Mecanizado Vertical, C. (2016). Línea d.
- García Hernández, C., Kyratsis, P., Gella-Marín, R., Efkolidis, N., y Huertas-Talón, J. (2016). *Wedm manufacturing method for noncircular gears, using cad/cam software* (Inf. Téc.).
- Haas Automation, I. (2023). *5-axis mills*. Descargado de <https://www.haascnc.com/>

`machines/multi-axis/5-axis-mills.html`

- Madekar, K. J., Nanaware, K. R., Phadtare, P. R., y Mane, V. S. (2016). Automatic mini cnc machine for pcb drawing and drilling. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(02), 1107–1108.
- Perez Silva, J. O. (2016). *Introducción al autocad en tres dimensiones*.
- Peydró Rasero, M. Á., Ivorra Martínez, J., Crespo Amorós, J. E., y Montava Jordà, S. (2022). Fresadora: partes de la fresadora.
- Placa de interfaz mach3 con aislamiento y acopladores. (2023). Descargado 2023-02-03, de <https://www.amazon.com/-/es/Placa-interfaz-MACH3-aislamiento-acopladores/dp/B07GKRW38K>
- Precision milling | mc machinery systems. (2023). Descargado de <https://www.mcmachinery.com/technologies/precision-milling/> ([Accessed on February 3, 2023])
- Ramírez Guerrero, L. R. (2019). *Máquina cnc para la elaboración de placas electrónicas; proceso de soldadura y colocación de componentes electrónicos* (B.S. thesis).
- Shetty, D., y Kolk, R. A. (2010). *Mechatronics system design*. CL-Engineering.
- Torres Arenas, J. S., y Hoyos Burbano, M. O. (2019). *Diseño e implementación de una maquina cnc de 4 grados de libertad* (Tesis Doctoral no publicada). Uniautónoma del Cauca. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería
- USA, M. (2023). *5-axis machines*. Descargado 2023-02-03, de <https://www.mazakusa.com/machines/process/5-axis/>
- Vega, L. Y., y Mesa, L. M. (2019). Integración de la impresión 3d en el proceso de cera perdida para la producción de joyas, con fines de estandarización. *Informador técnico*, 83(1), 51–65.
- Verma, G. (2018). *Autodesk fusion 360 black book*. BPB Publications.
- Viau Najarro, A. R. (2010). *Diseño del mecanismo para habilitar el cuarto eje de la fresadora cnc de la universidad del valle de guatemala*. (Tesis Doctoral no publicada). Universidad del Valle de Guatemala.
- Vorkapić, N. M., Živanović, S. T., y Dimić, Z. Ž. (2020). Development of an educational 3-axis cnc machine tool for rapid prototyping with two translational and one rotary axis. *Tehnika*, 75(6), 725–732.

ANEXOS

Anexo A: Matriz de Consistencia Lógica

Tabla 5

Matriz de consistencia.

MATRIZ DE CONSISTENCIA				
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Cual es el diseño idóneo para la construcción de el mecanismo que permita el funcionamiento de el cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el espacio y tiempo de trabajo en el proceso de mecanizado de moldes complejos de cera en una joyería?	Diseñar y construir el mecanismo que permita el funcionamiento de el cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el espacio y tiempo de trabajo en el proceso de mecanizado de moldes complejos de cera en una joyería.	Es posible diseñar y construir el cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el espacio y tiempo de trabajo en el proceso de mecanizado de moldes complejos de cera en una joyería.	-VI: Diseño. -VD: Espacio y tiempo.	Fresadoras CNC de 5 ejes.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Es posible identificar las restricciones para el proceso de diseño del mecanismo que permita el funcionamiento del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el espacio y tiempo de trabajo en el proceso de mecanizado de moldes complejos de cera en una joyería?	Identificar las restricciones mecánicas para el proceso de diseño del mecanismo que permita el funcionamiento del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el espacio y tiempo de trabajo en el proceso de mecanizado de moldes complejos de cera en una joyería.	Se identificarán los requerimientos para definir las restricciones del diseño y control del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el espacio y tiempo de trabajo en el proceso de mecanizado de moldes complejos de cera en una joyería.	-VI: Restricciones. -VD: Espacio y tiempo.	Fundamento de Materiales. Dinámica. Mecánica de materiales. Diseño mecánico. Parámetros de control CAM.
¿Es posible proponer el diseño mecánico y de control del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el espacio y tiempo de trabajo en el proceso de mecanizado de moldes complejos de cera en una joyería?	Proponer el diseño mecánico y de control del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el espacio y tiempo de trabajo en el proceso de mecanizado de moldes complejos de cera en una joyería.	Se propondrá el diseño mecánico y de control mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el espacio y tiempo de trabajo en el proceso de mecanizado de moldes complejos de cera en una joyería.	-VI: Diseño. -VD: Espacio y tiempo.	Circuitos eléctricos y electrónicos. Microprocesadores. Máquinas eléctricas. Diseño mecatrónico. Software CAM.

Nota: La primera parte de la matriz muestra al problema general y posteriormente a los problemas específicos en el desarrollo del proyecto.

Anexo A: Matriz de Consistencia Lógica

Tabla 6

Matriz de consistencia.

MATRIZ DE CONSISTENCIA				
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Es viable realizar el análisis de costos unitarios del diseño del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el espacio y tiempo de trabajo en el proceso de mecanizado de moldes complejos de cera en una joyería?	Realizar el análisis de costos unitarios de el diseño del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el espacio y tiempo de trabajo en el proceso de mecanizado de moldes complejos de cera en una joyería.	Se realizará el análisis de costos unitarios del diseño del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el espacio y tiempo de trabajo en el proceso de mecanizado de moldes complejos de cera en una joyería.	-VI: Diseño. -VD: Espacio y tiempo.	Gestión de mantenimiento. Análisis de costos unitarios.
¿Es factible construir el diseño del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el espacio y tiempo de trabajo en el proceso de mecanizado de moldes complejos de cera en una joyería?	Construir el diseño del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el espacio y tiempo de trabajo en el proceso de mecanizado de moldes complejos de cera en una joyería.	Se construirá el diseño del mecanismo del cuarto y quinto eje de una fresadora CNC para optimizar el espacio y tiempo de trabajo en el proceso de mecanizado de moldes complejos de cera en una joyería.	-VI: Diseño. -VD: Espacio y tiempo.	Tecnologías de manufactura.

Nota: La matriz de consistencia mejora la relación que existe entre las variables y los objetivos y su relación con el marco teórico consultado para el desarrollo del proyecto.

Anexo B: Operacionalización de Variables

La tabla 7 presenta la operacionalización de la variable dependiente: tiempo de mecanizado.

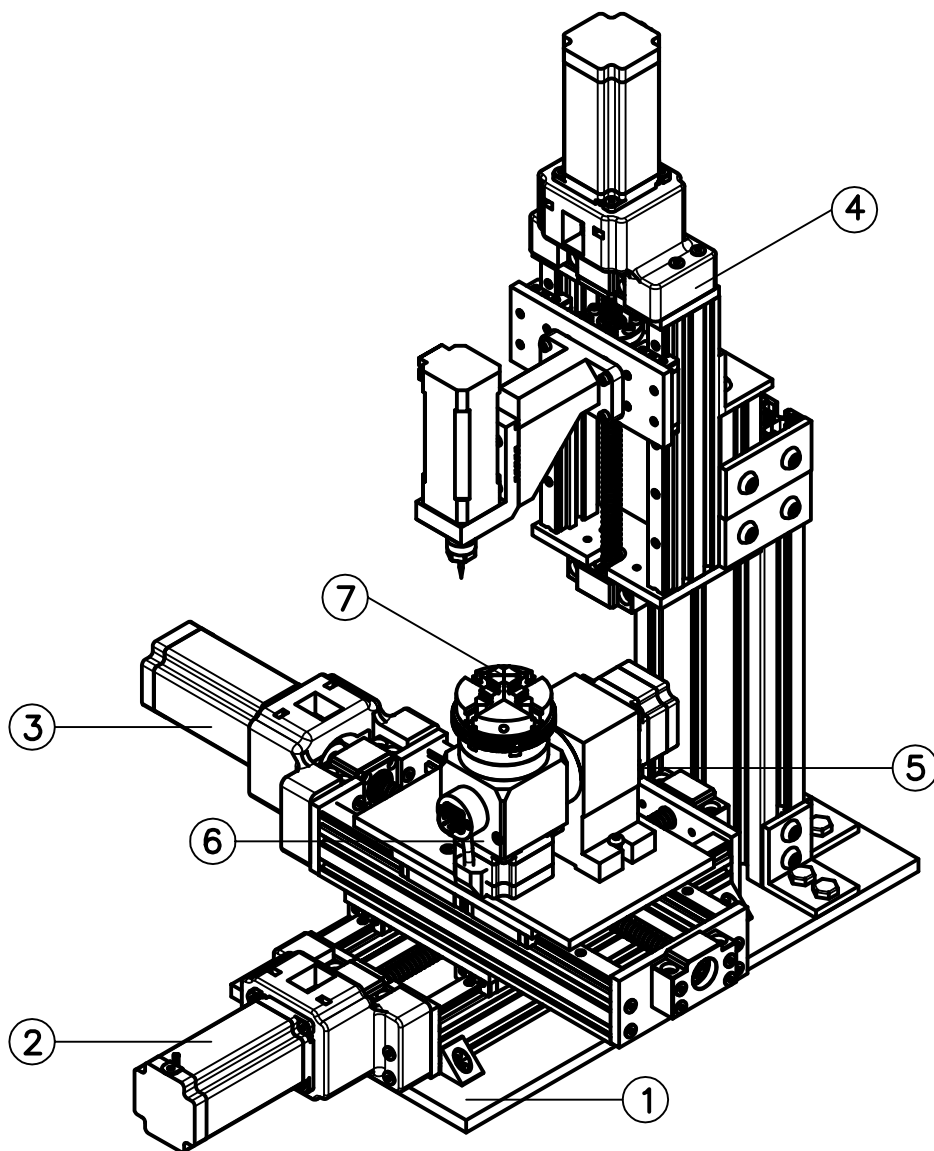
Tabla 7

Variable dependiente.

VARIABLE DEPENDIENTE: TIEMPO DE OPERACIÓN				
Dimensiones	Definiciones	Indicador	Magnitud	Instrumento de medición o Fuente
	Definición conceptual: Limita las dimensiones de elementos mecánicos.			
Espacio de trabajo.	Definición operacional: Es el volumen máximo que puede ocupar el mecanismo del quinto eje en el modelo CL5-001.	Espacio	Milímetros	Calibrador
Tiempo de operación de mecanizado	Definición conceptual: Permite determinar la duración de efectuar una tarea definida a ritmos de trabajo constantes, establecidas por condiciones determinadas (?).	Tiempo	Segundos	Cronómetro
	Definición operacional: Es la duración en minutos que tarda el centro de mecanizado de cuatro ejes en producir un molde de cera.			

Nota: La tabla presenta las definiciones de las dimensiones de la variable dependiente utilizada en la investigación, aplicadas al proceso de producción de moldes de cera, cada variable puede tener diferentes dimensiones y todas ellas deben ser medibles.

De acuerdo al anexo 10, los anexos presentan evidencias que se consideran relevantes para la explicación del documento como los instrumentos de recopilación de la información.



7	1	Mordaza de sujeción de 4 garras.	ISO 630/6361	Acero y aluminio	D64x33
6	1	Cabezal divisorio. (ejes A/C)	ISO 630/6361	Acero y aluminio	60x97x107
5	1	Cabezal de mesa. (eje B)	ISO 630/6361	Acero y aluminio	90x92x105
4	1	Carro vertical y husillo. (eje Z)	ISO 630/6361	Acero y aluminio	143x241x443
3	1	Carro longitudinal. (eje X)	ISO 630/6361	Acero y aluminio	135x498x64
2	1	Carro transversal. (eje Y)	ISO 630/6361	Acero y aluminio	135x498x64
1	1	Base y columna.	ISO 630/6361	Acero y aluminio	220x423x10

Pos.	Cant.	Denominación		Norma	Material	Dim. en bruto
		Nombre	Fecha	Ingeniería Mecatrónica		
Dibujado		Uzhca y Armijos	10/12/2023	SEDE MATRIZ CUENCA		
Comprobado		Ing. C. Cobos.	14/02/2023			
Proyección		Plano de conjunto.				Escala: 1:5
		CL5 - 001 Equipo estándar.				Lámina N° 01/01



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
SALESIANA**