



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CUARTO EJE PARA
EL SISTEMA CNC DE LA FRESADORA BRIDGEPORT DEL
LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA**

AUTORES: CÁRDENAS REYES, MARÍA AUGUSTA

DILLON ESCOBAR, JONATHAN JOEL

DIRECTOR: MSc. CORTEZ PAZMIÑO, BYRON HERNÁN

SANGOLQUÍ

2019



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "*DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CUARTO EJE PARA EL SISTEMA CNC DE LA FRESADORA BRIDGEPORT DEL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA*" fue realizado por el señor Dillon Escobar, Jonathan Joel y la señorita Cárdenas Reyes, María, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 18 de enero del 2019

Msc. Byron Hernán Cortez Pazmiño

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Dillon Escobar Jonathan Joel, con cédula de identidad N° 1724457765 y Cárdenas Reyes María Augusta, con cédula de identidad N° 17121755591, declaramos que este trabajo de titulación "*DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CUARTO EJE PARA EL SISTEMA CNC DE LA FRESADORA BRIDGEPORT DEL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA*" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 18 de enero del 2019

.....
María Augusta Cárdenas Reyes

CC. 1721755591

.....
Jonathan Joel Dillon Escobar

CC. 1724457765



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Dillon Escobar Jonathan Joel, con cédula de identidad N° 1724457765 y Cárdenas Reyes María Augusta, con cédula de identidad N° 17121755591, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CUARTO EJE PARA EL SISTEMA CNC DE LA FRESADORA BRIDGEPORT DEL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 18 de enero del 2019

María Augusta Cárdenas Reyes

CC. 1721755591

Jonathan Joel Dillon Escobar

CC. 1724457765

DEDICATORIA

El trabajo está dedicado principalmente a nuestros padres y familia, quienes a través de esta etapa de nuestra vida siempre estuvieron junto a nosotros, en el proceso de convertirnos en lo que somos ahora, en compartir nuestros sueños y ser el principal motor de nuestra vida. Gracias a sus consejos y ejemplo hoy vemos cumplir esta meta.

Jona y Magus

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios quien siempre nos sustentó ante las dificultades y nuestro caminar en esta hermosa etapa que hoy vemos culminar, A nuestros padres quienes supieron ser nuestros amigos y confidentes, formando ese carácter en nosotros. A nuestros hermanos a quienes les debemos mucho. A nuestras familias gracias por su cariño y amor.

Agradecemos a nuestras parejas quienes siempre estuvieron ahí para ayudarnos y compartir este sueño con nosotros.

Agradecemos de igual manera a nuestros amigos por siempre brindarnos una mano amiga y su total apoyo ante este camino hacia la ingeniería, gracias por esas grandes anécdotas.

Agradecemos a nuestros profesores quienes nos formaron académicamente, y en especial a nuestro tutor de tesis Ing. Byron Cortez, quien nos esforzó al máximo llevándonos a dar lo mejor de nosotros a fin de obtener un trabajo de excelencia.

Gracias a cada una de las personas que formaron parte de esta etapa en la cual fuimos probados de muchas formas, superando cada una y alcanzando la meta.

Yo Jonathan hago un especial agradecimiento a mi abuelita Zoilita a quien le debo mucho, con su amor supo levantarme siempre, por siempre creer en mí y ahora poder ver en quien me convertí.

Nuevos retos vienen y sabemos que no estamos solos en este caminar.

Jona y Magus

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|------|
| CERTIFICADO DEL DIRECTOR | i |
| AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD | ii |
| AUTORIZACIÓN | iii |
| DEDICATORIA | iv |
| AGRADECIMIENTO | v |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS | vi |
| ÍNDICE DE TABLAS | x |
| ÍNDICE DE FIGURA | xiii |
| RESUMEN | xvi |
| ABSTRACT | xvii |
| CAPÍTULO I | 1 |
| PRESENTACIÓN DEL PROYECTO | 1 |
| 1.1. Generalidades | 1 |
| 1.2. Definición del Problema | 1 |
| 1.3. Justificación e Importancia | 2 |
| 1.4. Alcance | 2 |
| 1.4.1. Componentes mecánicos | 3 |
| 1.4.2. Componentes electrónicos/eléctricos | 4 |
| 1.4.3. Componentes del sistema de control | 4 |
| 1.5. Objetivos | 4 |

| | |
|---|-----------|
| | vii |
| 1.5.1. Objetivo general | 4 |
| 1.5.2. Objetivos específicos | 5 |
| 1.6. Estructura del documento | 5 |
| CAPÍTULO II | 6 |
| Marco teórico | 6 |
| 2.1. CNC (Control Numérico por computador) | 6 |
| 2.1.1. Diferencia de una CNC de 3 ejes y una de 4 ejes | 7 |
| 2.2. Interpretadores de código G | 8 |
| 2.3. Tipos de motores para CNC | 9 |
| 2.4. Acoplamientos | 10 |
| 2.5. Diseño y manufactura asistidos por computador CAD/CAM | 11 |
| 2.6. Engranajes rectos y helicoidales | 13 |
| 2.7. Tallado de engranaje helicoidal | 14 |
| 2.8. Torno-fresado | 17 |
| CAPÍTULO III | 19 |
| DISEÑO DE UN CUARTO EJE PARA EL SISTEMA CNC DE LA FRESADORA BRIDGEPORT | 19 |
| 3.1. Estado actual de la máquina | 19 |
| 3.2. Casa de la calidad | 21 |
| 3.2.1. Voz del usuario | 21 |
| 3.2.2. Voz del ingeniero | 22 |
| 3.3. Modulación | 24 |
| 3.4. Módulo 1: Mecanismos | 27 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 3.4.2. | Mecanismo del cuarto eje (Módulo 1: Mecanismos) | 28 |
| 3.4.3. | Herramienta del husillo (Módulo 1: Mecanismos) | 30 |
| 3.5. | Módulo 2: Teach Pendant | 39 |
| 3.5.1. | Selección del controlador (Módulo 2: Teach Pendant) | 39 |
| 3.5.2. | Interpretador de código G (Módulo 2: Teach Pendant) | 40 |
| 3.5.3. | Interfaz humano máquina (HMI) (Módulo 2: Teach Pendant) | 41 |
| 3.5.4. | Diseño de la carcasa (Módulo 2: Teach Pendant) | 41 |
| 3.6. | Módulo 3: Sistema electrónico | 44 |
| 3.6.1. | Selección del motor (Módulo 3: Sistema electrónico) | 44 |
| 3.6.2. | Seguridad redundante (Módulo 3: Sistema electrónico) | 46 |
| 3.6.3. | Electrónica del sistema (Módulo 3: Sistema electrónico) | 47 |
| CAPÍTULO IV | | 51 |
| IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS | | 51 |
| 4.1. | Implementación | 51 |
| 4.1.1. | Implementación de base y acople para el motor del cuarto eje | 51 |
| 4.1.2. | Instalación del driver y la fuente para el motor del cuarto eje | 51 |
| 4.1.3. | Desarrollo de placas electrónicas del Teach Pendant y seguridad redundante | 52 |
| 4.1.4. | Instalación de placa electrónica de la seguridad redundante | 53 |
| 4.1.5. | Diseño e impresión de carcasa del Teach Pendant | 53 |
| 4.1.6. | Montaje de Teach Pendant | 54 |
| 4.1.7. | Diseño de la HMI del Teach Pendant | 54 |
| 4.2. | Pruebas | 58 |
| 4.2.1. | Prueba de control manual para el eje X | 59 |

| | |
|---|-----------|
| | ix |
| 4.2.2. Prueba de control manual para el eje Y | 59 |
| 4.2.3. Prueba de control manual para el eje Z | 60 |
| 4.2.4. Prueba de control manual para el eje E | 60 |
| 4.2.5. Control de proceso automático para el eje X | 61 |
| 4.2.6. Control de proceso automático para el eje Y | 62 |
| 4.2.7. Control de proceso automático para el eje Z | 64 |
| 4.2.8. Control de proceso automático eje E | 65 |
| 4.2.9. Prueba de funcionamiento del interpretador de código G | 67 |
| 4.2.10. Pruebas de engranes | 68 |
| 4.2.11. Pruebas de engranes rectos | 69 |
| 4.2.12. Pruebas de engranes helicoidales | 70 |
| 4.2.13. Pruebas de post procesado en SolidWorks | 73 |
| CAPÍTULO V | 75 |
| CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS | 75 |
| 5.1. Conclusiones | 75 |
| 5.2. Recomendaciones | 77 |
| 5.3. Trabajos futuros | 77 |
| Bibliografía | 78 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 <i>Ventajas, desventajas y aplicaciones del mecanizado con cuatro ejes</i> | 8 |
| Tabla 2 <i>Ventajas y desventajas de interpretadores de código G</i> | 8 |
| Tabla 3 <i>Características de motores paso por paso y servomotores</i> | 10 |
| Tabla 4 <i>Tipos de acoplamientos entre ejes</i> | 11 |
| Tabla 5 <i>Ventajas, desventajas y aplicaciones de los engranajes</i> | 14 |
| Tabla 6 <i>Ecuaciones para calcular engranes helicoidales</i> | 15 |
| Tabla 7 <i>Comparación de las modificaciones a la fresadora Bridgeport</i> | 20 |
| Tabla 8 <i>Módulos del proyecto</i> | 27 |
| Tabla 9 <i>Detalle de especificaciones</i> | 27 |
| Tabla 10 <i>Soluciones planteadas para la sujeción de la materia prima</i> | 28 |
| Tabla 11 <i>Soluciones planteadas para el mecanismo del cuarto eje</i> | 29 |
| Tabla 12 <i>Soluciones planteadas para la herramienta del husillo</i> | 31 |
| Tabla 13 <i>Características del motor</i> | 31 |
| Tabla 14 <i>Factor de corrección (mc) para materiales no ferrosos</i> | 32 |
| Tabla 15 <i>Planteamiento de las soluciones para el módulo 1: Mecanismos</i> | 36 |
| Tabla 16 <i>Evaluación de cada criterio</i> | 37 |
| Tabla 17 <i>Evaluación de las alternativas de la facilidad en la instalación</i> | 37 |
| Tabla 18 <i>Evaluación de las alternativas para dar el menor mantenimiento</i> | 37 |
| Tabla 19 <i>Evaluación de las alternativas para disponibilidad en el mercado</i> | 38 |
| Tabla 20 <i>Evaluación de las alternativas para el costo</i> | 38 |

| | | |
|----------|--|----|
| Tabla 21 | <i>Selección de la solución</i> | 38 |
| Tabla 22 | <i>Soluciones planteadas para selección del controlador</i> | 39 |
| Tabla 23 | <i>Soluciones planteadas para interpretador de código G</i> | 40 |
| Tabla 24 | <i>Planteamiento de las soluciones para el Módulo 2: Teach Pendant</i> | 42 |
| Tabla 25 | <i>Evaluación de cada criterio</i> | 42 |
| Tabla 26 | <i>Evaluación de las alternativas para una rápida transmisión de datos</i> | 43 |
| Tabla 27 | <i>Evaluación de las alternativas para dar un menor mantenimiento</i> | 43 |
| Tabla 28 | <i>Evaluación de las alternativas para el costo</i> | 43 |
| Tabla 29 | <i>Selección de la solución</i> | 44 |
| Tabla 30 | <i>Soluciones planteadas para selección del motor</i> | 45 |
| Tabla 31 | <i>Solución planteada para la seguridad redundante</i> | 46 |
| Tabla 32 | <i>Planteamiento de las soluciones para el Módulo 3: Sistema electrónico</i> | 48 |
| Tabla 33 | <i>Evaluación de cada criterio</i> | 49 |
| Tabla 34 | <i>Evaluación de las alternativas para la precisión</i> | 49 |
| Tabla 35 | <i>Evaluación de las alternativas para la disponibilidad en el mercado</i> | 49 |
| Tabla 36 | <i>Evaluación de las alternativas para el costo</i> | 49 |
| Tabla 37 | <i>Selección de la solución</i> | 50 |
| Tabla 38 | <i>Funcionamiento HMI del Teach Pendant</i> | 55 |
| Tabla 39 | <i>Distancias en mm para probetas del eje X</i> | 59 |
| Tabla 40 | <i>Distancias en mm para probetas del eje Y</i> | 59 |
| Tabla 41 | <i>Distancias en mm para probetas del eje Z</i> | 60 |
| Tabla 42 | <i>Distancias en grados para probetas del eje E</i> | 60 |
| Tabla 43 | <i>Distancias en mm para probetas del eje X</i> | 61 |

| | | |
|----------|---|----|
| Tabla 44 | <i>Distancias en mm para probetas del eje Y</i> | 63 |
| Tabla 45 | <i>Distancias en mm para las probetas del eje Z</i> | 64 |
| Tabla 46 | <i>Distancias en grados para las probetas del eje E</i> | 66 |
| Tabla 47 | <i>Parámetros de diseños para engrane recto</i> | 70 |
| Tabla 48 | <i>Parámetros de diseños para engrane helicoidal</i> | 71 |
| Tabla 49 | <i>Resultados para la altura del diente en engranes helicoidales y rectos</i> | 72 |
| Tabla 50 | <i>Resultados para el paso circular en engranes helicoidales y rectos</i> | 73 |

ÍNDICE DE FIGURA

| | |
|---|----|
| <i>Figura 1.</i> Caja negra de la fresadora CNC de cuatro ejes | 3 |
| <i>Figura 2.</i> Diagrama de flujo de los componentes mecánicos | 3 |
| <i>Figura 3.</i> Diagrama de flujo del sistema de control | 4 |
| <i>Figura 4.</i> Componentes de un sistema CNC | 6 |
| <i>Figura 5.</i> Dirección de una CNC de cuatro ejes..... | 7 |
| <i>Figura 6.</i> a) Motor a pasos y b) Servomotor | 10 |
| <i>Figura 7.</i> Entorno del Software SolidCAM integrado en SolidWorks | 13 |
| <i>Figura 8.</i> a) Engranajes rectos y b) engranajes helicoidales | 13 |
| <i>Figura 9.</i> Ángulo y paso de la hélice de un engranaje helicoidal | 15 |
| <i>Figura 10.</i> Fresa de modular o disco..... | 16 |
| <i>Figura 11.</i> Ángulo de inclinación (β) del cabezal universal para el tallado de hélices..... | 17 |
| <i>Figura 12.</i> Velocidades de corte en el Torno-Fresado | 18 |
| <i>Figura 13.</i> Sistema transmisor de potencia del Eje Z..... | 20 |
| <i>Figura 14.</i> Matriz de calidad del proyecto | 23 |
| <i>Figura 15.</i> Determinación de las funciones del proyecto..... | 25 |
| <i>Figura 16.</i> Determinación de los módulos | 26 |
| <i>Figura 17.</i> Deducción del ángulo β' para el cuarto eje | 30 |
| <i>Figura 18.</i> Diagrama de las fuerzas de corte en el fresado | 35 |
| <i>Figura 19.</i> HMI del Teach Pendant..... | 41 |
| <i>Figura 20.</i> Diseño de carcasa del Teach Pendant..... | 42 |
| <i>Figura 21.</i> Circuito de seguridad redundante diseñado..... | 46 |

| | |
|---|----|
| <i>Figura 22.</i> Circuito para la conexión del teclado | 47 |
| <i>Figura 23.</i> Circuito para la conexión del teclado | 48 |
| <i>Figura 24.</i> Cuarto eje de la fresadora Bridgeport..... | 51 |
| <i>Figura 25.</i> Driver y fuente del motor a pasos instalados..... | 52 |
| <i>Figura 26.</i> Placas electrónicas del Teach Pendant | 52 |
| <i>Figura 27.</i> Conexión de la placa electrónica de la seguridad redundante | 53 |
| <i>Figura 28.</i> Impresión de la carcasa del Teach Pendant..... | 53 |
| <i>Figura 29.</i> Instalación de placas electrónicas..... | 54 |
| <i>Figura 30.</i> Interfaz para diseño de engranajes helicoidales | 56 |
| <i>Figura 31.</i> Prueba de calibración automático Fuente: Propia | 58 |
| <i>Figura 32.</i> Prueba de desplazamiento en X..... | 62 |
| <i>Figura 33.</i> Rango de desplazamiento en X | 62 |
| <i>Figura 34.</i> Prueba de desplazamiento en el eje Y | 63 |
| <i>Figura 35.</i> Rango de desplazamiento en Y | 64 |
| <i>Figura 36.</i> Prueba de desplazamiento en Z..... | 65 |
| <i>Figura 37.</i> Rango de desplazamiento en X | 65 |
| <i>Figura 38.</i> Prueba de desplazamiento angular para el eje E | 66 |
| <i>Figura 39.</i> Rango de desplazamiento eje E..... | 67 |
| <i>Figura 40.</i> Simulación del código G para las pruebas de precisión | 67 |
| <i>Figura 41.</i> Simulación del código G para maquinado de letras | 68 |
| <i>Figura 42.</i> Interfaz de generación de código G..... | 69 |
| <i>Figura 43.</i> Fabricación de engranes rectos..... | 69 |
| <i>Figura 44.</i> Resultados del maquinado de engranes rectos | 70 |

| | |
|---|----|
| <i>Figura 45.</i> Posicionamiento del cabezal para engrane helicoidal izquierdo y derecho | 71 |
| <i>Figura46.</i> Resultado para engrane helicoidal derecho de módulos 1 y 2..... | 71 |
| <i>Figura47.</i> Resultado para engrane helicoidal izquierdo de módulos 1 y 2 | 72 |
| <i>Figura 48.</i> Diseño 3D en Solidworks de pieza a mecanizar | 73 |
| <i>Figura 49.</i> Resultado del maquinado de la pieza dibujada..... | 74 |
| <i>Figura 50.</i> Resultado del maquinado de la pieza dibujada con mejor acabado | 74 |

RESUMEN

En el presente trabajo se diseña e implementa un cuarto eje para un sistema CNC. El objetivo principal es implementar el mecanismo y diseñar el controlador de un eje rotacional para la fresadora Bridgeport. Los capítulos 1 y 2 describen las definiciones básicas de la tecnología CNC de 4 ejes, los controladores con su lenguaje de programación y los parámetros necesarios para mecanizar engranes helicoidales. Además, se analiza el interpretador de código G, PYCNC y la generación del código por software CAD/CAM. El capítulo 3 analiza los requerimientos que debe cumplir la máquina, de acuerdo con las necesidades del cliente. Después, se divide el proceso en módulos correspondientes a las partes mecánicas, eléctricas y de programación del cuarto eje, se plantea las posibles soluciones para cada módulo y se escoge la solución idónea para cada subsistema. El capítulo 4 indica la implementación de los módulos que conforman la CNC de 4 ejes, además se analizan los resultados obtenidos en el funcionamiento de la máquina para las pruebas de funcionalidad, precisión y repetibilidad con la realización de engranajes rectos y helicoidales. También se realizaron pruebas para el teach pendant, la ejecución de código G y del sistema de seguridad redundante anticollisiones. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del proyecto, las recomendaciones para manejar correctamente la fresadora y se proponen posibles trabajos futuros.

PALABRAS CLAVE:

- **CNC DE 4 EJES**
- **INTERPRETADOR DE CÓDIGO G**
- **TEACH PENDANT**
- **ENGRANAJES HELICOIDALES**

ABSTRACT

In the present work, the mechanism and the controller of the rotational CNC system axis in the Bridgeport milling machine are implemented and designed. Chapters 1 and 2 describe the basic definitions of 4-axis CNC technology, the controllers with their programming language and the parameters needed to manufacturing helical gears. The G code is analyzed by PYCNC complement and code generation by CAD / CAM software is analyzed. Chapter 3 analyzes the requirements that the machine must meet, according to the customer's needs. Then, the process is divided into modules corresponding to the mechanical, electrical and programming parts of the fourth axis, the possible solutions for each module are considered and the ideal solution for each subsystem is chosen. Chapter 4 indicates the implementation of the modules that make up the 4-axis CNC, in addition the results obtained in the operation of the machine are analyzed for functionality, accuracy and repeatability tests with the manufacturing of spur and helical gears. Tests were also carried out for the teach pendant, the G code execution and the redundant anti-collision safety system. Finally, chapter 5 presents the conclusions of the project, the recommendations to correctly handle the milling machine and possible future work is proposed.

KEYWORDS:

- **4 AXIS CNC**
- **G CODE INTERPRETER**
- **TEACH PENDANT**
- **HELICAL GEARS**

CAPÍTULO I

PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

1.1. Generalidades

En la actualidad los procesos de manufactura emplean un control numérico computarizado (CNC) que es común en la industria. Las máquinas CNC de 4 ejes, son principalmente usadas para fabricar piezas mecánicas metálicas de alta precisión y robustez, además que las aplicaciones han ido creciendo a tal punto de maquinar varios materiales.

1.2. Definición del Problema

La automatización aplicada a procesos industriales se enfoca principalmente en la disminución del margen de error en la producción. Las piezas a mecanizar deben ser precisas, tener buen acabado y ser resistentes. Al presentarse estos tipos de requerimientos en una pieza, es necesario efectuar programas de mecanizado con el uso de una herramienta fundamental como lo es un Control Numérico Computarizado (CNC). Esta máquina ofrece una mayor precisión, lo que implica una mejora total en la producción, también puede ejecutar procesos complejos que son muy difíciles de realizar de forma manual.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, el Laboratorio de Procesos de Manufactura cuenta con varias máquinas y herramientas orientadas a distintos procesos de mecanizado entre los principales torneado y fresado. Al tratarse de máquinas en su mayoría manuales, se requiere la implementación de la tecnología necesaria para que funcionen de forma automática.

Actualmente el Laboratorio de Procesos de Manufactura tiene máquinas que fueron actualizadas, pero que se encuentran en desuso por la falta de equipos o herramientas. Esto afecta

principalmente al desarrollo académico de los estudiantes que se encuentran aprendiendo sistemas flexibles.

1.3. Justificación e Importancia

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE presenta pocos equipos de tecnología actual, por lo cual el Laboratorio de Procesos de Manufactura requiere aumentar la maquinaria necesaria para el alto número de estudiantes en las ramas de Procesos de manufactura. Esto permite fomentar el desarrollo académico de los estudiantes, además de mecanizar piezas complejas en tiempos reducidos y modificar ciertos parámetros importantes de manufactura como velocidad de avance, costo de pieza, entre otros.

Adicionalmente, uno de los principales problemas en el desarrollo de las prácticas de laboratorio de sistemas flexibles corresponde a la manufactura de engranes helicoidales. Por esta razón, se propone la automatización del sistema para procesamiento de código G y la implementación de un cuarto eje, con la finalidad de posibilitar el maquinado de piezas complejas y obtener un mejor acabado superficial. De manera que los estudiantes puedan tener acceso a nuevas tecnologías de maquinado que permitan realizar las prácticas de laboratorio.

1.4. Alcance

El proceso de fresado de cuatro ejes se compone por varios requerimientos, necesarios para llevar a cabo el maquinado de la pieza que se menciona en la caja negra de la Figura 1. Entre estos se especifica el consumo de energía, el posicionamiento de los 4 ejes y el código de la pieza a mecanizar. Así como también, una herramienta para fresar precisamente engranajes helicoidales y rectos de la materia prima escogida.

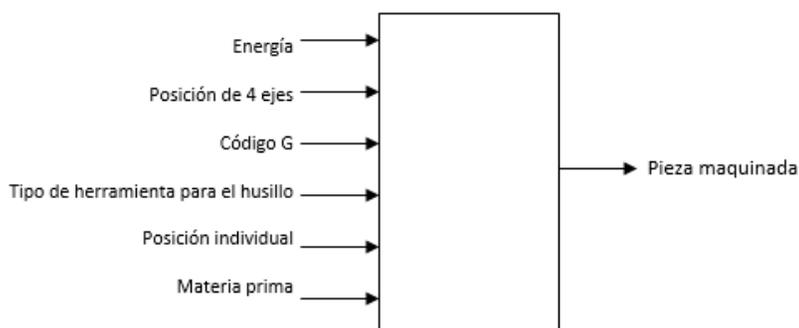


Figura 1. Caja negra de la fresadora CNC de cuatro ejes
Fuente: Propia

1.4.1. Componentes mecánicos

En cuanto al sistema mecánico, se desarrolla en tres partes. La primera corresponde al diseño e implementación de un elemento transmisor de potencia para el cuarto eje. El segundo corresponde a la construcción de piezas y ensamble del sistema transmisor y la tercera parte es el mantenimiento y optimización de recursos de la fresadora vertical. El sistema mecánico se detalla en el diagrama de flujo de la Figura 2.

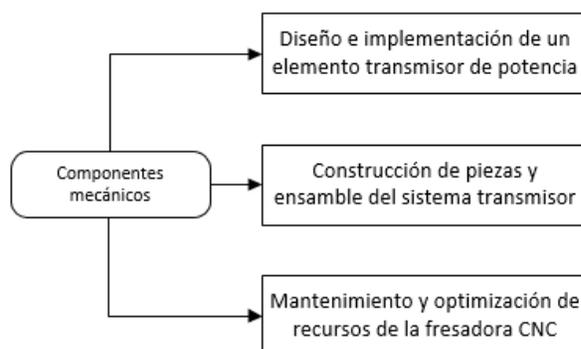


Figura 2. Diagrama de flujo de los componentes mecánicos
Fuente: Propia

El diseño e implementación del elemento transmisor de potencia, consta de incluir un acople para el motor en el mandril con el que cuenta la fresadora, así como también los cálculos para la correcta elección del motor.

Se pretende revisar ejes, motores y drivers dar un mantenimiento preventivo recomendado en este tipo de fresadoras.

1.4.2. Componentes electrónicos/eléctricos

La zona electrónica del sistema está conformada por los circuitos del panel de control y la etapa de potencia para encender los motores. Además, la programación del avance de los ejes y las conexiones necesarias para el teach pendant.

1.4.3. Componentes del sistema de control

Los componentes del sistema de control son dos. El primero es el rediseño del control manual y automático para implementación del cuarto eje y el segundo corresponde al rediseño del HMI. También se plantea realizar un manual de usuario para la operar la fresadora Bridgeport. El sistema de control se detalla en el diagrama de flujo de la Figura 3.

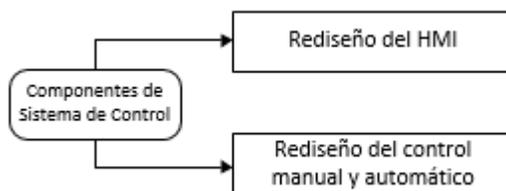


Figura 3. Diagrama de flujo del sistema de control
Fuente: Propia

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un cuarto eje a un sistema CNC de la máquina fresadora Bridgeport, de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

1.5.2. *Objetivos específicos*

- Diseñar y construir un teach pendant para el control manual de la fresadora Bridgeport.
- Implementar el control automático del sistema de fresado CNC para uso de 4to eje en la fresadora vertical Bridgeport.
- Realizar pruebas de manufactura en el sistema CNC de 4 ejes para la detección y corrección de errores, a fin de obtener una precisión rotacional del cuarto eje de $\pm 0.8^\circ$

1.6. Estructura del documento

El presente documento consta de cinco capítulos distribuidos de la siguiente forma:

El primer capítulo detalla la definición del problema, los objetivos y el alcance del proyecto.

El segundo capítulo comprende el principio de funcionamiento de la CNC y el apoyo teórico que es necesario para la automatización de la misma.

El tercer capítulo explica el procedimiento realizado para desarrollar el diseño eléctrico, mecánico y la programación.

El cuarto capítulo detalla la construcción y el funcionamiento de las partes y piezas de la máquina.

El quinto capítulo indica las pruebas desarrolladas con la CNC, los resultados y las conclusiones del proyecto.

Finalmente, se adjuntan los anexos como: manual del usuario, planos mecánicos y eléctricos.

CAPÍTULO II

Marco teórico

En el siguiente capítulo se explica la información necesaria para el desarrollo del proyecto de titulación, como son el principio de funcionamiento de una CNC, las principales características de un Control Numérico Computarizado de cuatro ejes, además de presentar las principales ventajas de un equipo de este tipo sobre uno convencional de 3 ejes. También es necesario recopilar información sobre las partes fundamentales del Sistema de Control de la máquina, que son el interpretador de código G, los tipos de actuadores y acoples para el eje rotacional. Y por último mencionar los cálculos necesarios para maquinar engranes rectos y helicoidales, así como también las herramientas necesarias a utilizarse.

2.1. CNC (Control Numérico por computador)

La tecnología CNC consiste en el control del movimiento de una herramienta en un determinado plano, esto se realiza por medio de un conjunto de órdenes escritas en código que son procesadas en un computador y dan acción al efector final. Este tipo de maquinaria es utilizada en la industria principalmente en la manufactura para mejorar los tiempos producción, abaratar costos y mejorar la productividad. Una máquina CNC está compuesta por los componentes que se observan en la Figura 4.

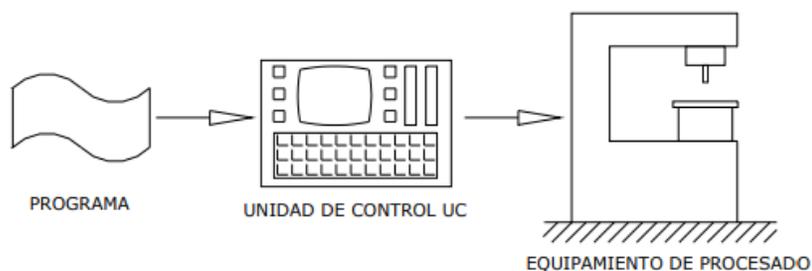


Figura 4. Componentes de un sistema CNC

Fuente: (Plata, 2015)

- El programa es el conjunto de instrucciones escritas de forma secuencial en código.
- El controlador procesa las órdenes enviadas por el programa y las codifica para accionar el hardware de la máquina.
- El equipamiento de procesamiento corresponde a la parte física, esta ejecuta las órdenes con la herramienta seleccionada. (P. Groover, 2001)

2.1.1. Diferencia de una CNC de 3 ejes y una de 4 ejes

Una fresadora CNC de 3 ejes opera en dos ejes, el eje X y Y, donde la pieza se coloca de forma fija en la mesa mientras la herramienta de corte se mueve a lo largo de los 3 ejes. También se puede utilizar para operaciones como: fresado de placas en dos dimensiones, perfilado, ranurado, entre otros usos. En cambio, la fresadora CNC de 4 ejes implica los mismos procesos involucrados en el mecanizado de 3 ejes, opera en los ejes X, Y y Z, con la diferencia que incluye un eje rotacional, el cual se observa en la Figura 5 con el nombre de C. En la mayoría de los casos, la pieza de trabajo girará para permitir que se produzca el corte alrededor del cuarto eje. En la Tabla 1 se observan las ventajas, desventajas y aplicaciones de una CNC con cuatro ejes. (Inverse Solutions, 2018)

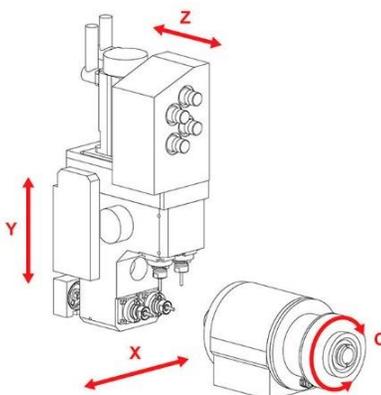


Figura 5. Dirección de una CNC de cuatro ejes
Fuente: (Industry, 2015)

Tabla 1*Ventajas, desventajas y aplicaciones del mecanizado con cuatro ejes*

| Ventajas | Desventajas | Aplicaciones |
|---|---|--|
| -Reduce la intervención del recurso humano en el proceso. -Proporciona alta confiabilidad y precisión. -Programación flexible. -Mecaniza varias piezas de forma rápida. -Simplifica el trabajo del operador. -Permite maquinar piezas complejas. Disminuye el tiempo de producción. | -Maquinaria costosa. -El operador requiere capacitación antes de utilizar la máquina. -El operador debe tener conocimientos en programación para solucionar posibles errores de código y seleccionar el número de herramientas. | -Mecanizado de modo continuo (ocurre cuando la pieza gira). -Mecanizado de envoltura (realiza grabados alrededor del cilindro). -Desarrollo de engranes rectos o helicoidales. |

Fuente: (Technologies, 2016)

2.2. Interpretadores de código G

Un interpretador de código G forma parte fundamental del sistema de control de una CNC, la principal función que cumple es procesar las órdenes enviadas por el computador y convertirlas en señales que accionan los motores para lograr la posición deseada. Además, esta parte se encarga de obtener datos de distintos sensores que tiene la máquina, como son los fines de carrera. En la Tabla 2 se observan las principales características que tienen los interpretadores de código G que fueron considerados para el desarrollo del presente proyecto.

Tabla 2*Ventajas y desventajas de interpretadores de código G*

| | Ventajas | Desventajas |
|--------------|--|--|
| PyCNC | - Usa lenguaje de alto nivel como Python Código abierto (modificable) Controlador: Raspberry, tiene un procesador de bajo consumo de energía y alto desempeño. - Operación del código G en tiempo real. | - La programación no incluye el movimiento de los ejes de forma manual. - Funciona únicamente en sistema operativo Jessie o inferior en Raspberry Pi. |

CONTINÚA →

| | | |
|-------------------|---|--|
| | - Posibilidad de ingresar un 5to eje. | - No posee HMI |
| | - Código G programable. | |
| | - Sistema de seguridad interno en dimensión de área de trabajo. | |
| Machinekit | - Utiliza sistema operativo de software libre llamado Linux Código abierto (modificable). | - Únicamente en Raspberry 2. |
| | - Usa lenguaje de alto nivel como Python. | - Inestable en varias placas. |
| | - Basado en LinuxCNC. | - Real time depende de la configuración del kernel. |
| | - Control realtime kernel. | - Requiere como controlador a un computador con: |
| | - Implementación hasta 4 ejes. | 8 GB de espacio en el disco duro |
| | | Procesador x86 a 1,2 GHz |
| | | 1GB de RAM |
| | | Tarjeta gráfica con resolución de 1024x768. |
| CNCControl | - Controla los límites de la máquina, mantiene coordenadas de referencia. | - Retraso en microsegundos al realizar adquisición de datos. |
| | - Movimiento de los ejes manual y automático. | - Conexión USB CNC. |
| | - Utiliza Windows XP, Windows 7 o Linux como sistema operativo. | - No es realtime. |
| | - Sistema robusto. | - Únicamente 3 ejes programables. |
| | | - No tiene código abierto. |

Fuente: (Khabarov, 2018)

2.3. Tipos de motores para CNC

Los motores son una parte fundamental de una CNC, son los encargados de mover la máquina en los ejes X, Y, Z y rotacional, para el caso de tener 4 ejes. Los servomotores y los motores paso a paso son dos clases de motores más utilizados en las máquinas CNC. En la Figura 6 se muestra la comparación física de un motor a pasos y un servomotor, la comparación técnica se muestra en la Tabla 3.



Figura 6. a) Motor a pasos y b) Servomotor
Fuente: (AMCI, 2016)

Tabla 3

Características de motores paso por paso y servomotores

| Características | Tipos de motores | |
|-------------------------------|--|---|
| | Motor paso a paso | Servomotores |
| Velocidad | - Hasta 2000 RPM | - Disponible con mayor velocidad a 2000 RPM |
| Voltaje | - De 5, 6,12 o 24V DC | - De 4 a 6V DC |
| Corriente | - De 50 mA a 1A | - De 100 mA a 2A |
| Velocidad de operación | - 60 rpm o 1 rotación por segundo | - Rango de 0.05 a 0.2 s/ 60 grados |
| Torque | - Hasta 200 kgf-cm | - Rango de 0.5 a 10 kgf-cm |
| Precisión | - Del 3 al 5% de un paso | - Resolución de entre 1 grado a 10 grados |
| Aplicaciones | - Recomendado cuando se requiere alto torque a bajas velocidades | - Recomendado para trabajar con altas velocidades y alto torque |

Fuente: (Braga, 2003)

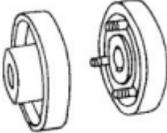
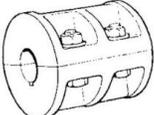
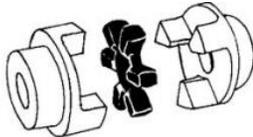
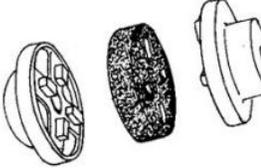
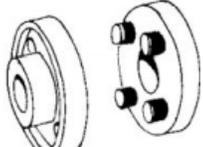
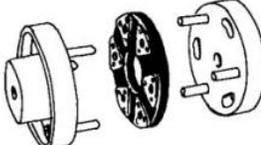
Los motores a pasos como servomotores funcionan en varias máquinas de control numérico.

Los motores más utilizados por su disponibilidad y fácil uso, son los motores paso a paso.

2.4. Acoplamientos

Los acoples son elementos de máquinas tienen como función unir o transmitir movimiento entre dos ejes. Estos mecanismos se dividen según las condiciones de transmisión en: rígidos y flexibles. En la Tabla 4 se explican los tipos de acoplamientos más comunes.

Tabla 4*Tipos de acoplamientos entre ejes*

| | | |
|---|---|--|
| <p>Acoplamientos rígidos Acoplan dos ejes sin permitir ningún movimiento. Requieren una buena alineación.</p> | <p>Con brida o plato</p>  | <p>Dos platos unidos con tornillos colocados a los extremos de los ejes.</p> |
| <p>Acoplamientos flexibles No tiene una buena alineación, por lo que utiliza elementos elásticos para absorber la energía producida.</p> | <p>De manguito partido</p>  | <p>Dos mitades concéntricas unidas por tornillos y tuercas.</p> |
| | <p>De cruceta</p>  | <p>Una cruceta de caucho entre dos semi cuerpos de metal.</p> |
| | <p>Tipo perfect</p>  | <p>Un disco de caucho ranurado que encajada entre dos cuerpos de aleación de aluminio.</p> |
| | <p>Tipo Crown Pm</p>  | <p>Dos discos unidos por brida metálica con amortiguadores en los pasadores.</p> |
| | <p>De disco flexible</p>  | <p>Disco de caucho y acero entre dos bridas con pasadores de acero.</p> |

Fuente: (Nieto, López, & Galvis, 2018)

2.5. Diseño y manufactura asistidos por computador CAD/CAM

Para mejorar la producción se requiere la utilización de computadoras, donde la tecnología CAD/CAM se aplica en máquinas con Control Numérico Computarizado (CNC). Las CNC son

empleadas principalmente para el desarrollo de muchos procesos de manufactura con una alta producción y exactitud dimensional.

Un sistema CAD/CAM está conformado de las siguientes etapas:

- CAD (Dibujo Asistido por Computador): Es un software que representa gráficamente la pieza a maquinar, ya sea en 2D o 3D.
- CAM (Manufactura Asistida por Computador): Es un software que parte del dibujo realizado e ingresa los parámetros de corte necesarios para el mecanizado y simula el proceso. Después, se traduce la simulación al lenguaje de la máquina CNC y se transmite el código G para el mecanizado real de la pieza.

A continuación, se detallan algunos softwares CAM:

- HSMWorks: Programa de manufactura CAM que se integra con Inventor y SolidWorks. Puede realizar corte en 2D y 3D, programación de tornos y maquinado simultáneo en los 3 ejes. También contiene varias marcas de post procesadores integrados de varias marcas de CNC, se puede editar en línea y simulación de máquinas CNC. (AUTODESK, 2018)
- SolidCAM: Software para manufactura CAM 3D como se observa en la Figura 7, integrado con SolidWorks y Autodesk Inventor ejecuta operaciones como corte, fresado y torno para centros de maquinado CNC. Además, posee una tecnología que permite sincronizar material, herramienta y máquina para evitar errores, herramientas dañadas y asegura maquinar las piezas en un tiempo óptimo. (SOLIDCAM, 2015)

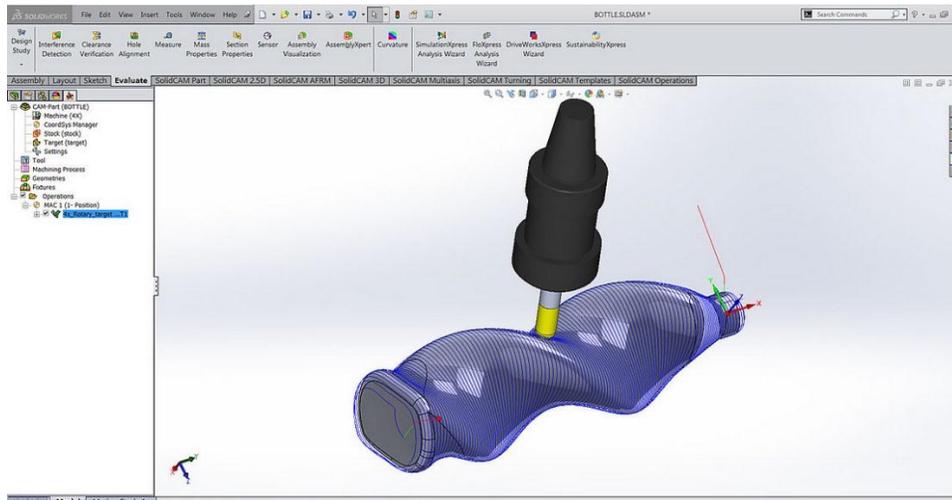


Figura 7. Entorno del Software SolidCAM integrado en SolidWorks
Fuente: (SOLIDCAM, 2015)

- SolidWorks CAM: Complementa SolidWorks CAD permitiendo desarrollar diseños y su fabricación a través de una herramienta software y un modelo 3D. Además de que los diseños pueden ser evaluados con anticipación para evitar costos inesperados y retrasos en la producción.

2.6. Engranajes rectos y helicoidales

Los engranajes son ruedas dentadas utilizadas principalmente para la transmisión de potencia, los principales tipos son los engranes rectos y helicoidales que se observan en la Figura 8. En la Tabla 5 se detalla una comparación de las ventajas, desventajas y principales aplicaciones.

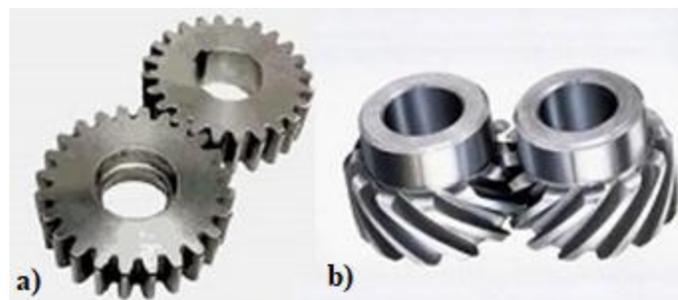


Figura 8. a) Engranajes rectos y b) engranajes helicoidales
Fuente: (Ingemecánica, 2014)

Tabla 5
Ventajas, desventajas y aplicaciones de los engranajes

| | Engranés rectos | Engranés Helicoidales |
|---------------------|--|---|
| Ventajas | <ul style="list-style-type: none"> - Fácil de diseñar y mecanizar. - Fiables. - No tiene fuerza axial. - Proporciona velocidad constante y estable. - Transmite hasta 50 000 kw de potencia. | <ul style="list-style-type: none"> - Silenciosos. - Utilizados para altas cargas. - Duraderos. - Transmiten potencia y movimiento en ejes paralelos. - Presentan menor desgaste. |
| Desventajas | <ul style="list-style-type: none"> - No transmite potencia en ejes no paralelos. - Velocidades bajas. - Ruidosos a altas velocidades. - Poco resistentes. | <ul style="list-style-type: none"> - Se calientan sus dientes al estar en contacto, por lo que se produce menor eficiencia al perder energía. - Genera una fuerza axial. - Producción costosa. |
| Aplicaciones | <ul style="list-style-type: none"> - Para variar el torque o la potencia se utilizan en lavadoras, secadoras, bombas de combustible, entre otros. - Para modificar la velocidad se usan en relojes mecánicos. - Utilizados en motores de aviones. | <ul style="list-style-type: none"> - Por la transmisión de potencia a velocidades altas se utiliza en la caja reductora de automóviles, maquinaria de hostelería. - Por generar menor ruido se utiliza en automoción y climatización. |

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

2.7. Tallado de engranaje helicoidal

Para realizar el tallado de un engranaje helicoidal es necesario tomar en cuenta algunos parámetros: el ángulo (β) y el paso (P) de la hélice, como se observa en la Figura 9. El ángulo de la hélice (β) corresponde a los grados de inclinación del cabezal o de la mesa, además este valor permite calcular el paso de la hélice. Según el ángulo de la hélice se pueden dividir los engranes helicoidales en engranajes que transmiten movimiento entre ejes paralelos ($\beta < 30$) y perpendiculares ($\beta > 45$).

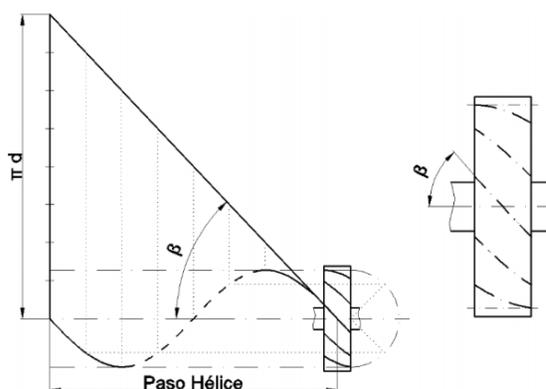


Figura 9. Ángulo y paso de la hélice de un engranaje helicoidal
Fuente: (OCW, 2015)

El paso de la hélice (P) es la distancia axial entre dos puntos de la hélice primitiva, está dado por:

$$P = \pi \times d \times \cotg(\beta) \quad (1)$$

Donde, d representa al diámetro primitivo en los engranajes.

Otros parámetros son imprescindibles calcular para dar las características requeridas a los dientes del engranaje, estas fórmulas se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6

Ecuaciones para calcular engranes helicoidales

| Parámetro | Ecuación |
|-----------------|---|
| Módulo normal | $m_n = m_c \times \cos(\beta) = \frac{P_n}{\pi} = \frac{d \times \cos(\beta)}{z}$ |
| Módulo circular | $m_c = \frac{m_n}{\cos(\beta)} = \frac{d}{z} = \frac{P_c}{\pi}$ |
| Paso normal | $P_n = m_n \times \pi = P_c \times \cos(\beta)$ |
| Paso circular | $p_c = m_c \times \pi = \frac{p_n}{\cos(\beta)} = \frac{d \times \pi}{z}$ |

CONTINÚA →

| | |
|---|--|
| Paso axial | $p_x = \frac{p_n}{\text{sen}(\beta)} = \frac{p_c}{\text{tg}(\beta)}$ |
| Longitud de la hélice desarrollada | $L = \frac{P}{\cos(\beta)}$ |
| Diámetro primitivo | $d = \frac{m_n \times z}{\cos(\beta)} = \frac{p_c \times z}{\pi} = m_c \times z$ |
| Diámetro exterior | $d_e = d + 2m_n = \frac{m_n \times z}{\cos(\beta)} + 2m_n$ |
| Diámetro interior | $d_f = d - 2.5m_n = \frac{m_n \times z}{\cos(\beta)} - 2.5m_n$ |
| Número de dientes | $z = \frac{d \times \cos(\beta)}{m_n} = \frac{d}{m_c}$ |
| Altura del diente | $h = 2.25 m_n$ |

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

La herramienta más común para mecanizar engranajes es la fresa de disco como se observa en la Figura 10, este tipo de fresas sirven para maquinar engranajes o piñones de tipo rectos o helicoidales. También son conocidas como fresas modulares, son herramientas intercambiables hechas de un metal resistente por lo que permiten altas velocidades, alta precisión y un excelente acabado superficial.

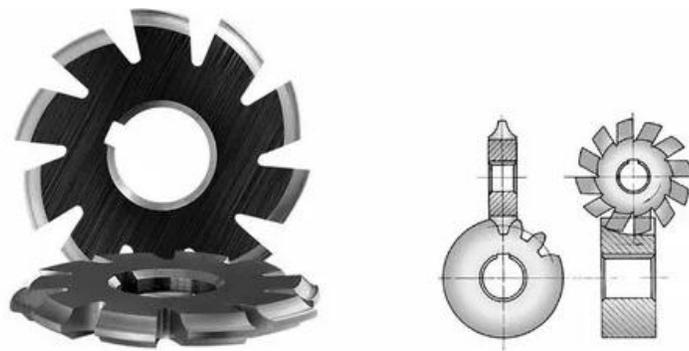


Figura 10. Fresa de modular o disco

Fuente: (TECNO-WIDIA, 2018)

El tallado de los engranajes se realiza con una correcta sincronización entre dos movimientos, el primero es el de traslación de la mesa de la fresadora y el de rotación que se intercala entre el husillo y el cabezal divisor.

Para el tallado de hélices del engranaje helicoidal se puede considerar la inclinación de la mesa de la máquina o del cabezal universal, como se muestra en la Figura 11, el ángulo a inclinar será β (ángulo de hélice) que puede tener un valor máximo de 45 grados.

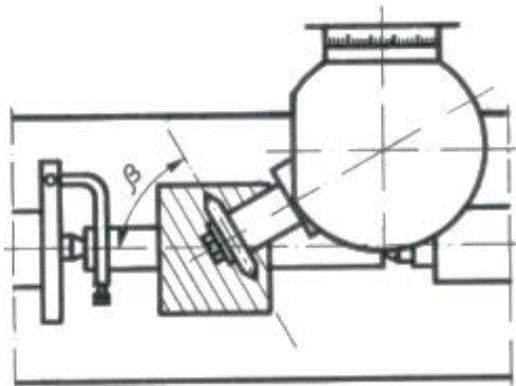


Figura 11. Ángulo de inclinación (β) del cabezal universal para el tallado de hélices

Fuente: (Carrasco García, 2006)

2.8. Torno-fresado

Un proceso de torno-fresado corresponde al fresado de una pieza cilíndrica mientras rota en un eje. Es un método utilizado en CNC de 4 y 5 ejes para el maquinado de piezas simétricas de rotación como son por ejemplo los engranajes rectos o helicoidales. Además, entre otras ventajas del torno fresado se puede nombrar que minimiza el tiempo de producción y el desgaste de la herramienta de corte, temperaturas bajas de corte y un buen acabado superficial.

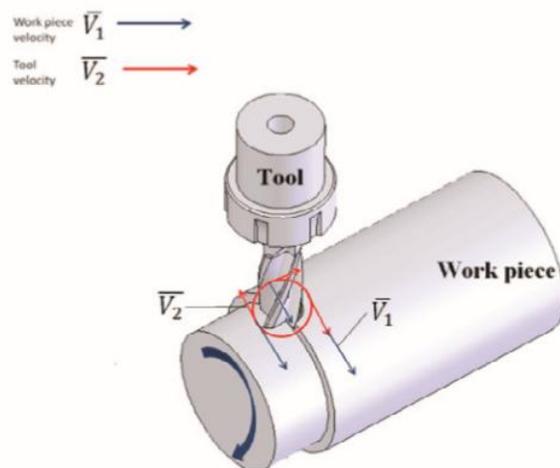


Figura 12. Velocidades de corte en el Torno-Fresado

Fuente: (Karaguzel, Bakkal, & Approach, 2012)

Las velocidades de corte en el torno-fresado ortogonal se indican en la Figura 12, donde V_1 es la velocidad de la pieza de trabajo y V_2 es la velocidad de la herramienta de corte, cabe recalcar que las dos velocidades están ubicadas en el mismo plano y se calculan con las siguientes ecuaciones (Karaguzel, Bakkal, & Approach, 2012):

$$V_{cr} = \vec{V}_2 - \vec{V}_1 \quad (2)$$

$$V_{cr} = V_2 + V_1 \times \cos(90 - \phi) \quad (3)$$

$$V_1 = 2\pi \times (R_w - a_p) \times n_w \quad (4)$$

$$V_2 = 2\pi \times R_t \times n_t \quad (5)$$

CAPÍTULO III

DISEÑO DE UN CUARTO EJE PARA EL SISTEMA CNC DE LA FRESADORA BRIDGEPORT

El siguiente capítulo explica las condiciones actuales de la fresadora CNC Bridgeport y los resultados que se obtuvieron en el trabajo de titulación “Diseño e implementación de un sistema CNC para la automatización de una fresadora Bridgeport perteneciente al laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas”. Una vez identificados los requerimientos para diseñar el cuarto eje, se realiza la matriz QFD que permite diseñar un producto en respuesta a las necesidades del usuario, tomando en cuenta también los aspectos técnicos. Posteriormente se analizan los subsistemas de los que va a estar compuesto la máquina que contiene la parte mecánica, electrónica y programación, también el consumo de energía y las comunicaciones entre estaciones. Cada subsistema es analizado a detalle, considerando las alternativas disponibles y los cálculos necesarios para justificar los componentes escogidos.

3.1. Estado actual de la máquina

La fresadora CNC Bridgeport de tres ejes se localizó con los controles manual y automático habilitados y funcional únicamente el control manual. Con respecto a los actuadores de cada eje, el motor que permite el desplazamiento del eje “Z” fue golpeado y estaba fallando. Además, no se dispone del computador que permite cargar el código G.

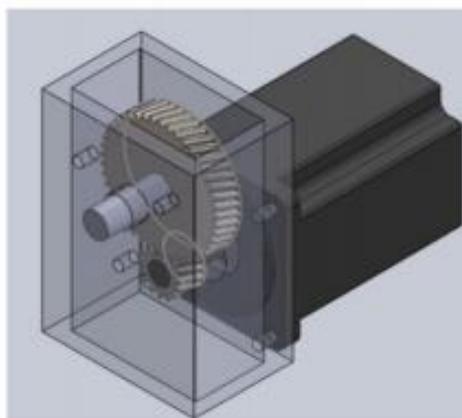


Figura 13. Sistema transmisor de potencia del Eje Z
Fuente: (González Ricadeneira & Changoluisa Santacruz, 2016)

En el eje Z se produjo un error en el movimiento del motor, lo que afecta principalmente a la precisión del maquinado. Además, se genera un ruido fuerte, debido al fallo de la transmisión de potencia en la caja de engranes que se observa en la Figura 13.

En la Tabla 7 se detallan algunas características del estado actual de la máquina, comparadas con las modificaciones a realizarse en el presente proyecto.

Tabla 7

Comparación de las modificaciones a la fresadora Bridgeport

| | Estado actual de la máquina | Aporte |
|---------------------------|---|--|
| Control Manual | - Mantenimiento y reparación. | - Mantenimiento de ejes. |
| Control automático | - Basado en Arduino y sistemas libres. | - Basado en Python y sistemas libres. |
| Teach Pendant | - Analógico en Arduino. | - Independiente basado en software libre. |
| Código G | - Diseñado / al momento no cuenta con compilador de código G. | - Implementación y rediseño de sistema de ejecución de código G. |
| Sistema Operativo | - Windows. | - Software libre. |

CONTINÚA →

| | | |
|------------------------------------|-------------------------|---|
| Número de ejes | - 3 ejes. | - Implementación del 4to eje. |
| Husillo | - Mantenimiento. | - Mantenimiento. |
| Sistema eléctrico | - Reemplazo. | - Mantenimiento. |
| HMI | - No especifica. | - Diseño e implementación de HMI. |
| Mecanismo de ejes | - Reemplazo de motor. | - Implementación de motor 4to eje y mantenimiento de motores. |
| Driver de motores | - Reemplazo de drivers. | - Driver para 4to eje. |
| Precisión | - $\pm 0,1$ mm. | - Mantener $\pm 0,1$ mm. |
| Sistema de transmisión ejes | - Funcional. | - Mantenimiento. |

Fuente: Propia

3.2. Casa de la calidad

La casa de la calidad es una matriz QFD (Quality Function Deployment) que propone el diseño de un producto o servicio que se basa en las necesidades del cliente. Permite clasificar los requerimientos funcionales y técnicos según su importancia, obteniendo como resultado las características principales que formarán parte del producto final. (Rojas, 2009).

3.2.1. Voz del usuario

Según el Jefe de Laboratorio de Procesos de Manufactura Ingeniero Byron Cortez, Docente de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, la fresadora debe contar con las siguientes características:

1. Programación en software libre
2. Carcasa de teach pendant anti-polvo

3. Interfaz fácil de usar
4. Bajo riesgo de accidentes
5. Manufacturar piezas en 3D
6. Dispositivo para el control manual y automático
7. Funcionamiento simultáneo de los ejes

3.2.2. *Voz del ingeniero*

Todos los requerimientos del cliente son expresados de forma técnica en las siguientes características:

1. Programación en python
2. Diseño robusto
3. HMI
4. Nivel de Automatización
5. Interpretador de código G
6. Teach pendant
7. Control sincronizado de actuadores

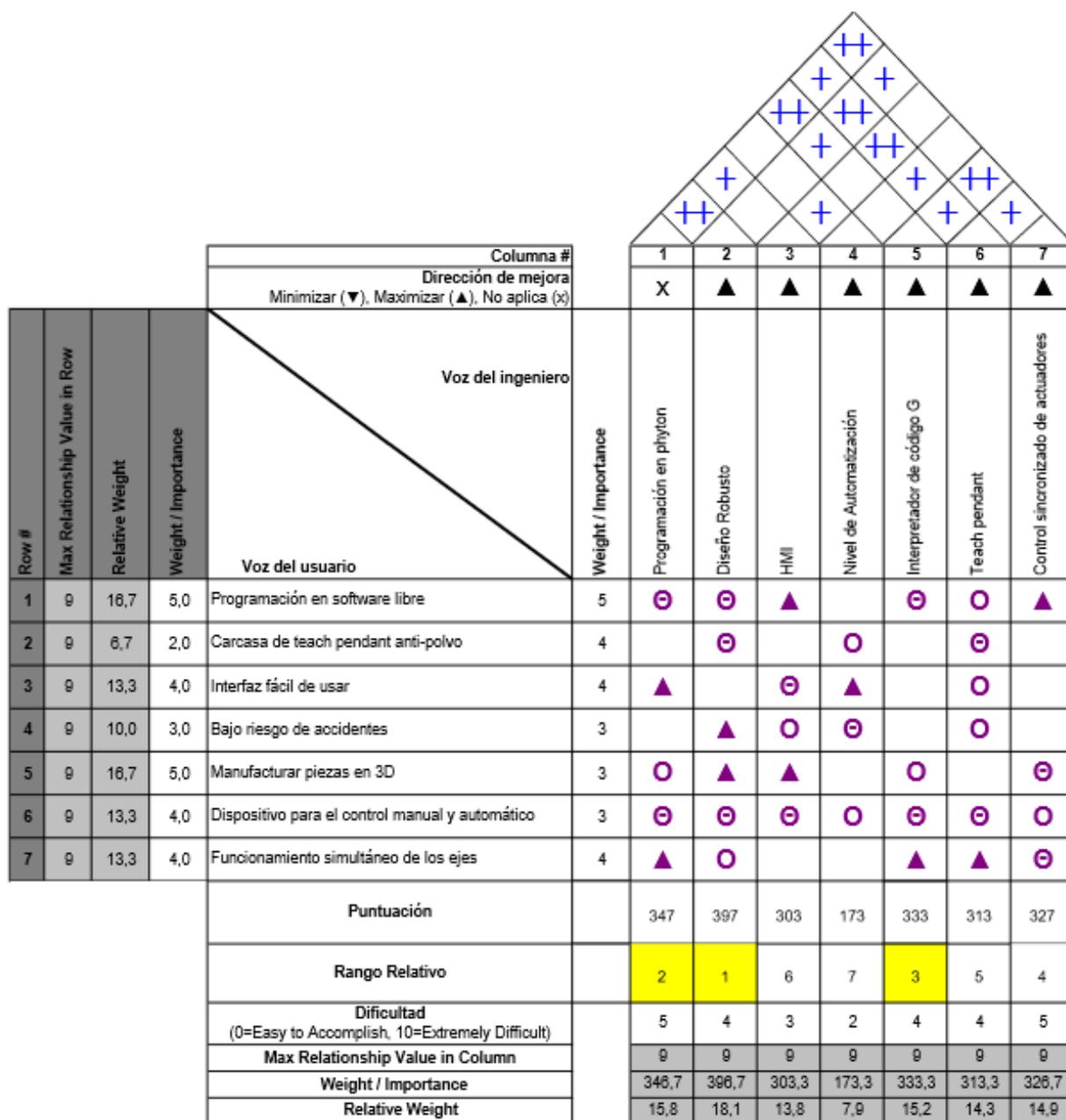


Figura 14. Matriz de calidad del proyecto

Fuente: Propia

El análisis realizado con la matriz de la calidad permite identificar las características más relevantes a ser consideradas en el desarrollo del proyecto. Se observa en la Figura 14, como resultado se obtuvieron los principales requerimientos del producto:

- Diseño robusto: La máquina debe funcionar en ambientes industriales con varias perturbaciones o ruidos.
- Programación en python: El código se va a desarrollar en un software libre, el cual permita realizar posteriores mejoras.
- Interpretador de código G: El lenguaje de código utilizado para la CNC va a ser interpretado y ejecutado de forma automática por la tarjeta de control.

3.3. Modulaci3n

La estructura modular de un producto o sistema consiste en identificar y ordenar de forma secuencial las funciones de m3dulos relacionados entre s3. Este proceso se realiza con el objetivo de agrupar las funciones en la menor cantidad posible de m3dulos e identificar sus interrelaciones. Tambi3n este tipo de an3lisis plantea de forma clara los recursos que consume cada funci3n, a estos se los llama interfaces. Una interface puede ser de tipo mec3nica, de energ3a, de transferencia de materiales o de se3al, cada una con su simbolog3a respectiva. (Riba, 2002)

En la Figura 15 se muestran a detalle las funciones correspondientes al presente proyecto, en la que las interfaces principales son el consumo de energ3a el3ctrica, el paso de la se3al a controlar y el material a maquinar. La agrupaci3n de estas funciones conforma los m3dulos que se observan en la Figura 16, donde se identificaron tres m3dulos.

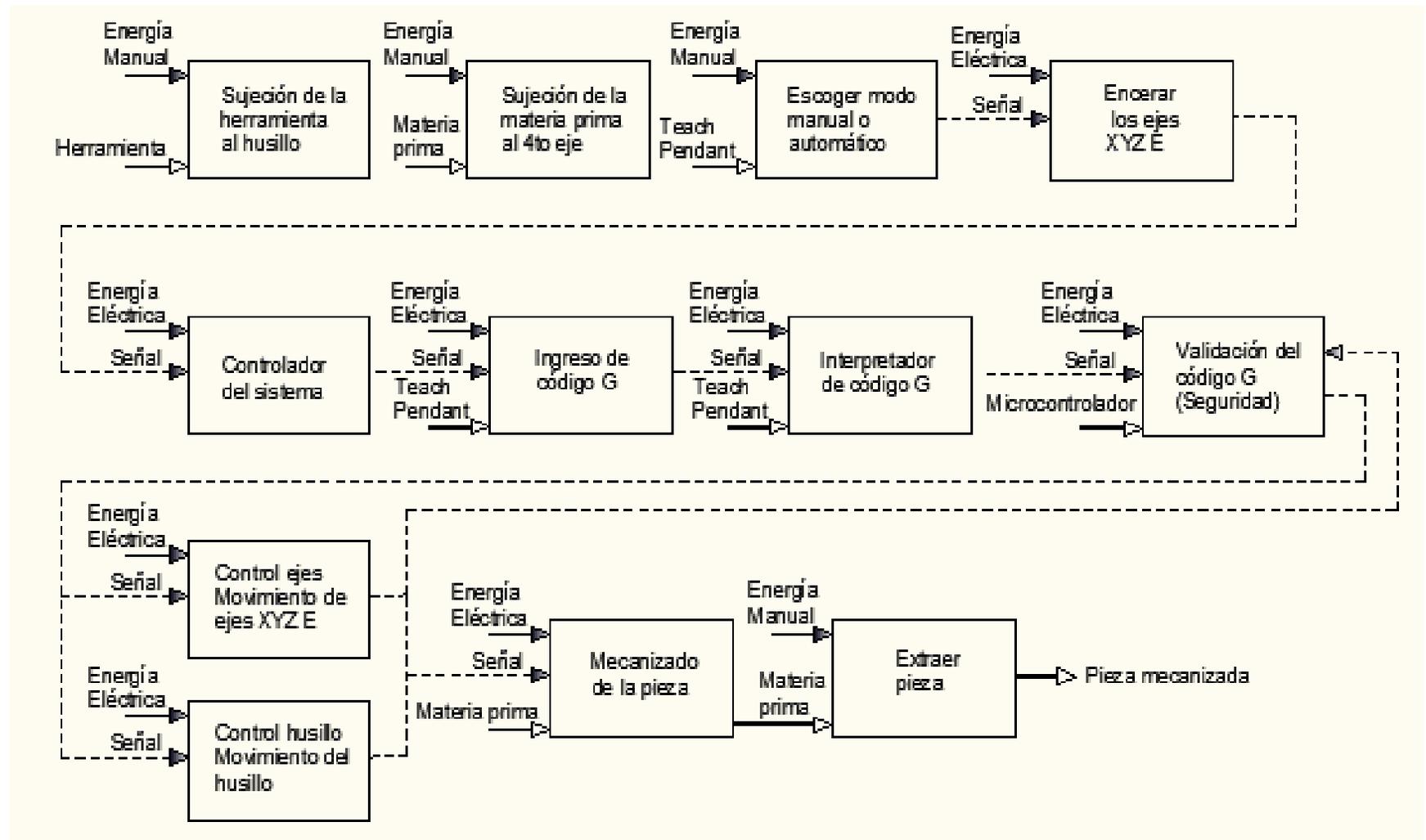


Figura 15. Determinación de las funciones del proyecto

Fuente: Propia

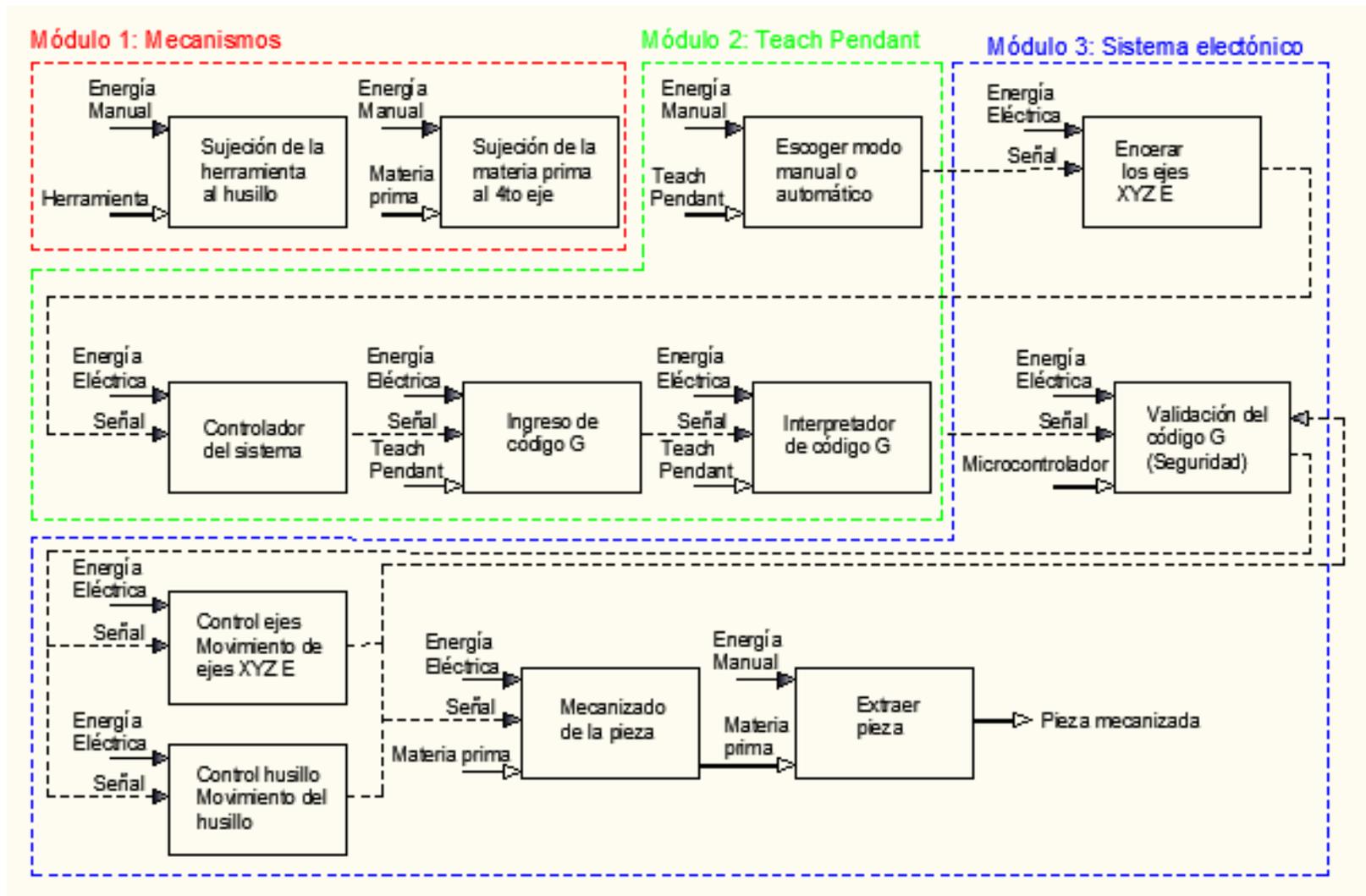


Figura 16. Determinación de los módulos

Fuente: Propia

Como resultado del análisis por modulación se obtuvieron los subsistemas con sus respectivas funciones que se observan en la Tabla 8. En la siguiente sección se analizan las soluciones propuestas para los tres módulos con el fin de evaluar y seleccionar las mejores alternativas.

Tabla 8
Módulos del proyecto

| Módulos | Funciones |
|------------------------------|--|
| 1.Mecanismos | Sujeción de materia prima Mecanismo del cuarto eje Herramienta del husillo |
| 2. Teach Pendant | Selección de controlador Interpretador de código Interfaz humano máquina (HMI) Diseño de la carcasa |
| 3.Sistema electrónico | Selección del motor Selección de fuentes Seguridad redundante Electrónica del sistema |

Fuente: Propia

3.4. Módulo 1: Mecanismos

El primer módulo se conforma por la sujeción del material, el mecanismo del cuarto eje y la herramienta del husillo. Estas funciones constituyen el punto mecánico del proceso, para el análisis matemático de las mismas se considera los parámetros previamente determinados en la tesis anterior, datos que se observan en la Tabla 9.

Tabla 9
Detalle de especificaciones

| Métrica | Magnitud | Unidad |
|--|-----------------|---------------|
| Desplazamientos de los ejes X,Y,Z | 400 x 300 x 290 | mm |
| Velocidad de avance X,Y,Z | 250 x 250 x 250 | mm/min |
| Precisión | ± 0.1 | mm |
| Velocidad de husillo | 2500 | rpm |

Fuente: (González Ricadeneira & Changoluisa Santacruz, 2016)

3.4.1. Sujeción de la materia prima (Módulo 1: Mecanismos)

La sujeción de materia prima determina el tipo de material que se puede manufacturar, su selección depende del tipo de pieza a mecanizar. Es así que se tienen las opciones que se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10

Soluciones planteadas para la sujeción de la materia prima

| Soluciones | Ventajas | Desventajas |
|--|---|--|
| <p>Plato de tres garras</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Autocentrante • Proporciona un agarre interior y exterior • No requiere montaje • Fácil fijación de la pieza | <ul style="list-style-type: none"> • No puede sujetar una barra cuadrada • No puede descentrarse |
| <p>Plato de cuatro garras</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Sujeta barras cuadradas o asimétricas • Se puede descentrar • Alta precisión a velocidades elevadas | <ul style="list-style-type: none"> • Poco comunes • Montaje de la pieza complicado • No sostiene barras hexagonales |
| <p>Mandriles de pinzas</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Sujeción rápida • Fijación exacta y segura • Concentricidad del material | <ul style="list-style-type: none"> • Requiere un plato porta-pinzas • Superficie de la pieza a mecanizar sin rebabas • Solo para piezas cilíndricas |

Fuente: (Valera, 2012)

3.4.2. Mecanismo del cuarto eje (Módulo 1: Mecanismos)

Una parte fundamental de una CNC de 4 ejes es el mecanismo del eje rotacional, ya que en este se implementa el control del giro y su resultado influye directamente en la precisión de las piezas realizadas. En la Tabla 11 se analizan las dos posibles soluciones a implementar.

Tabla 11*Soluciones planteadas para el mecanismo del cuarto eje*

| Soluciones | Ventajas | Desventajas |
|---|--|---|
| Acople de motor directo  | <ul style="list-style-type: none"> • Fácil montaje y desmontaje • Alineamiento fácil y rápido • Absorben vibraciones | <ul style="list-style-type: none"> • Requieren mantenimiento frecuente • Pueden calentarse |
| Mecanismo tornillo sin fin y corona  | <ul style="list-style-type: none"> • Instalación sencilla • Compacto • Resisten temperaturas elevadas • Versátil | <ul style="list-style-type: none"> • Requieren potencia alta • Disponible en tamaños pequeños |

Fuente: (Montalvo, 2016)

- **Ángulo rotacional para cuarto eje β'**

Para el mecanizado de engranes helicoidales es importante tomar en cuenta el número de grados que debe girar la pieza durante la elaboración. Este ángulo representado en la Figura 17, ayuda a evitar la variación del ángulo de hélice (β) y la modificación del espesor del diente (CU), además permite mantener la geometría del ancho de la cara del diente (AC). (Martinez, 2016)

$$CU = AC \times \tan(\beta) \quad (6)$$

$$\beta' = 2 \times \text{asin} \left(\frac{CU}{2R} \right) \quad (7)$$

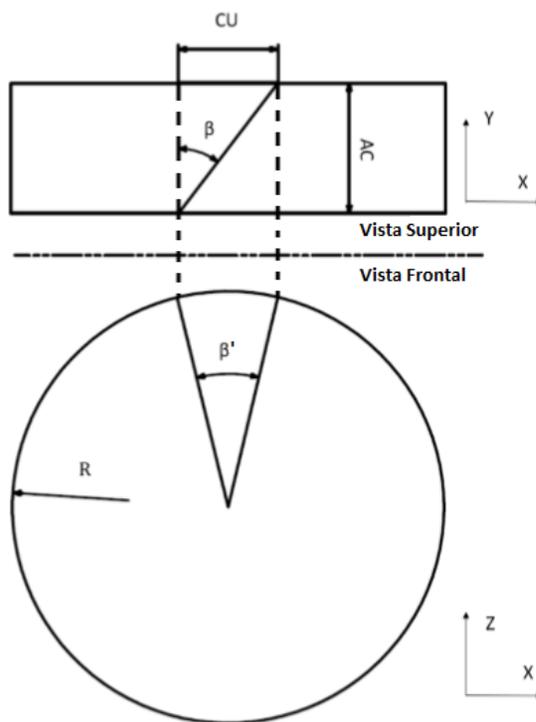


Figura 17. Deducción del ángulo β' para el cuarto eje
Fuente: (Martinez, 2016)

Para tomar un ejemplo de cálculo, se asume un ancho del diente de $AC = 5 \text{ mm}$ con un ángulo de hélice de $\beta = 30^\circ$. Se obtiene como resultado que el ángulo rotacional para el cuarto eje debe de ser de $\beta' = 3.98^\circ$.

3.4.3. Herramienta del husillo (Módulo 1: Mecanismos)

La selección de la herramienta para el fresado de los dientes en engranajes rectos y helicoidales es fundamental para un correcto mecanizado. Las opciones a analizar son la fresa modular y la fresa de tipo End mill. La fresa de disco o modular es una herramienta estandarizada en forma de disco dentado que permite el tallado de engranajes. En cambio, la herramienta End mill es utilizada para operaciones especiales en engranajes. En la Tabla 12 se analizan las principales ventajas y desventajas de estas herramientas.

Tabla 12
Soluciones planteadas para la herramienta del husillo

| Soluciones | Ventajas | Desventajas |
|--|--|--|
| Fresa modular  | <ul style="list-style-type: none"> • Variedad de fresas para diferentes módulos y números de dientes • Fácil montaje • Herramienta estandarizada | <ul style="list-style-type: none"> • Costosa • Inexactitud por desgaste |
| Fresa end mill  | <ul style="list-style-type: none"> • Útil para materiales como plástico y madera • Acabado de calidad y con alta precisión • Realiza operaciones especiales en engranajes | <ul style="list-style-type: none"> • Dificultad en el afilado • Poca disponibilidad en el mercado • No están diseñados para maquinar varios dientes |

Fuente: (García, 2008)

- **Cálculo de la fuerza de corte**

Debido a que el centro de mecanizado de 4 grados de libertad tiene como objetivo la manufactura de engranes helicoidales se realiza un análisis de los tipos de herramientas y configuraciones que se pueden usar para la manufactura de dichos engranes. También, se requiere de la potencia de corte, velocidad del husillo y velocidad de avance de corte. El cálculo de la fuerza de corte se realiza para saber la fuerza que debe emplear la herramienta del husillo al maquinar, esta se calcula tomando en cuenta los siguientes datos del motor que se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13
Características del motor

| | Motor del husillo |
|--------------------------------|--------------------------|
| Potencia | 2 HP/ 1491.4W |
| Frecuencia | 60 Hz |
| Voltaje de entrada (AC) | 220 V |
| RPM máxima | 2500 RPM |
| Velocidad de avance | 250 mm/min |

Fuente: (González Rivadeneira & Changoluisa Santacruz, 2016)

Se realiza un fresado frontal sobre una aleación de fundición con base de aluminio. El factor de corrección se obtuvo de la Tabla 14, datos que pertenecen al catálogo de Sandvik.

AISI, Si $\geq 13\%$ con:

$$k_{c1} = 700 \frac{N}{mm^2} \text{ Fuerza de corte específica}$$

$$m_c = 0.25 \text{ Factor de corrección}$$

Tabla 14

Factor de corrección (m_c) para materiales no ferrosos

| Grupo de materiales | Subgrupo de materiales | Proceso de fabricación | Tratamiento térmico | nom | Fuerza de corte específica, k_{c1} (N/mm ²) | m_c | |
|---------------------|--|------------------------|---------------------|-----------------|---|-------|------|
| 1 | 1 comercial puro | Z | UT | 30 HB | 350 | 0.25 | |
| 1 | 2 | Z fundición | UT | 60 HB | 400 | 0.25 | |
| 1 | 2 | Z | AG | envejecido | 100 HB | 650 | 0.25 |
| 1 | 2 aleaciones AISi, Si $\leq 1\%$ | S sinterizado | UT | sin tratar | 75 HB | 410 | 0.25 |
| 1 | 2 | C | NS | sin especificar | 80 HB | 410 | 0.25 |
| 1 | 3 aleaciones de fundición AISi, Si $\leq 1\%$ y $< 13\%$ | C fundición | UT | sin tratar | 75 HB | 600 | 0.25 |
| 1 | 3 | C | AG | envejecido | 90 HB | 700 | 0.25 |
| 1 | 4 aleaciones de fundición AISi, Si $\geq 13\%$ | C | NS | sin especificar | 130 HB | 700 | 0.25 |
| 2 | 0 grupo principal | C fundición | UT | sin tratar | 70 HB | | |
| 3 | 1 aleaciones de cobre sin plomo (incl. cobre electrolítico) | U | sin especificar | UT | 100 HB | 1350 | 0.25 |
| 3 | 2 latón y bronce al plomo (Pb $\leq 1\%$) | C fundición | UT | sin tratar | 90 HB | 550 | 0.25 |
| 3 | 2 | S sinterizado | UT | | 35 HB | | |
| 3 | 3 aleaciones de fácil mecanizado con base de cobre (Pb $> 1\%$) | U | sin especificar | UT | 110 HB | 550 | 0.25 |
| 3 | 4 bronce de alta resistencia ($> 225\text{HB}$) | C fundición | UT | | 300 HB | | |
| 4 | 0 grupo principal | C fundición | UT | sin tratar | 70 HB | | |

Fuente: (SANDVIK, 2012)

Para continuar con los cálculos se asume un engrane helicoidal de módulo 3, $\beta = 30$, $z = 24$ dientes y ancho de cara $AC = 5$ mm. Se maquina utilizando una herramienta de módulo $m_n = 3$, D herramienta = 70 mm, $z = 12$ dientes, ángulo de engrane de 15 a 20 grados. (TECNO-WIDIA, 2018)

El ancho del diente (a_p) hace referencia al paso circular (P_c) y su resultado equivale a:

$$a_p = \frac{P_c}{2} \quad (8)$$

$$a_p = 5.43 \text{ mm}$$

La altura del diente calculada esta relacionada con el módulo nominal y su valor es:

$$a_e = 2.25 m_n \quad (9)$$

$$a_e = 6.75 \text{ mm}$$

$N = 2500 \text{ RPM max}$ Revoluciones por minuto máxima

$k_r = 20$ Ángulo de posición

La velocidad de corte (V_c) con diámetro de la herramienta y de las revoluciones se calcula:

$$V_c = \frac{N \times \pi \times D_{herramienta}}{1000} \quad (10)$$

$$V_c = 550 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Los siguientes parámetros se desarrollan para aplicar la ecuación 13 que corresponde a la constante k_c , necesaria para el calcular la fuerza de corte.

El avance por diente (f_z) se obtuvo del catálogos de Sandvik.

$$f_z = 0.35 \frac{\text{mm}}{\text{diente}} \text{ Avance por diente}$$

Velocidad del husillo / Avance de mesa

$$V_f = N \times f_z \times z \quad (11)$$

$$V_f = 10.5 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Promedio del grosor de la viruta (h_a)

$$h_a = \frac{180 \operatorname{sen}(k_r) \times a_e \times f_z}{\pi \times D_{herramienta} \times \operatorname{sen}^{-1}\left(\frac{a_e}{D_{herramienta}}\right)} \quad (12)$$

$$h_a = 0.08 \text{ mm}$$

$$k_c = k_{c1} \times h_a^{-m_c} \quad (13)$$

$$k_c = 1316.2 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

- Fuerza de corte (F_c)

$$F_c = k_c \times a_p \times f_z \quad (14)$$

$$F_c = 2.5 \text{ kN}$$

Potencia de corte (P_c)

$$P_c = \frac{a_e \times a_p \times V_f \times k_{c1}}{60 \times 10^6} \quad (15)$$

$$P_c = 4.45 \text{ kW}$$

Como resultado de los cálculos se obtuvo que para maquinarse una pieza de aleación de aluminio es necesaria una fuerza de corte de 2.5kN.

- **Velocidad de corte en torno-fresado**

Se consideran las velocidades de la herramienta y de la pieza a mecanizar, para calcular la velocidad de corte en el maquinado de engranes rectos o helicoidales con la fresa modular como se observa en la Figura 18.

\bar{V}_2 Velocidad de la herramienta

\bar{V}_1 Velocidad de la pieza en el cuarto eje

$$V_{cr} = \bar{V}_2 - \bar{V}_1$$

$$V_{cr} = V_2 + V_1 \times \cos(90 - \phi) \quad (16)$$

$$V_2 = 550 \frac{mm}{min}$$

$$V_1 = 2\pi \times (R_w - a_p) \times n_w \quad (17)$$

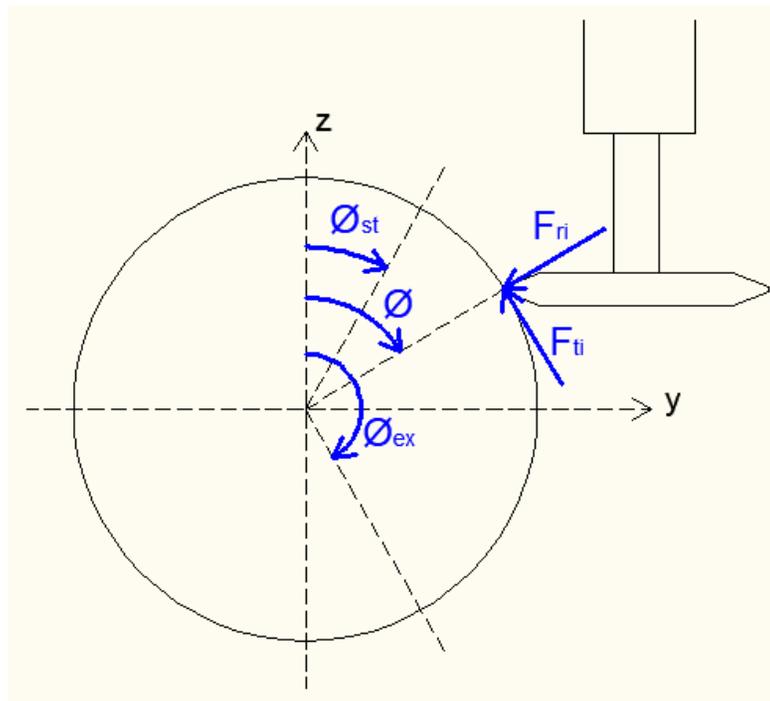


Figura 18. Diagrama de las fuerzas de corte en el fresado
Fuente: Propia

El ángulo de inmersión (ϕ) es igual a 90 grados por lo que se realiza sobre el eje Y.

Se tiene una velocidad de avance recomendada $V_f = 250 \frac{mm}{min}$ y un $AC = 5 mm$ del engrane

helicoidal, se calcula el tiempo de fresado.

$$t = \frac{AC}{V_f} \quad (18)$$

$$t = 20 \times 10^{-3} \text{ min}$$

Se tiene un $\beta' = 3.98$ al dividirlo para el tiempo de fresado, se obtiene las revoluciones por minuto que debe dar la pieza ubicada en el cuarto eje.

$$n_w = \frac{3.98^\circ}{20 \times 10^{-3}} \times \frac{1 \text{ rev}}{360^\circ}$$

$$n_w = 0.553 \text{ rpm}$$

$$V_1 = 2\pi \times (R_w - a_e) \times n_w \quad (19)$$

$$V_1 = 131.41 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Obteniendo una velocidad de corte resultado de la ecuación 3.

$$V_{cr} = 381.14 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

A continuación, se analizan las matrices de priorización para seleccionar la solución idónea del primer módulo.

Tabla 15

Planteamiento de las soluciones para el módulo 1: Mecanismos

| Módulo 1: mecanismos | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Funciones | Solución 1 | Solución 2 | Solución 3 |
| Sujeción de la materia prima | - Plato de tres garras. | - Plato de cuatro garras. | - Mandril de pinza. |
| Mecanismo del cuarto eje | - Mecanismo tornillo sin fin. | - Mecanismo tornillo sin fin. | - Acople del motor directo. |
| Herramienta del Husillo | - Fresa modular. | - Fresa end mil. | - Fresa end mil. |

Fuente: Propia

Tabla 16*Evaluación de cada criterio*

| | Facilidad en la instalación | Menor mantenimiento | Disponibilidad en el mercado | Costo | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--------------|------------------------------|--------------------|
| Facilidad en la instalación | | 1 | 0.5 | 1 | 3.5 | 0.350 |
| Menor mantenimiento | 0 | | 1 | 1 | 3 | 0.300 |
| Disponibilidad en el mercado | 0.5 | 0 | | 0.5 | 2 | 0.200 |
| Costo | 0 | 0 | 0.5 | | 1.5 | 0.150 |
| | | | | TOTAL | 10 | 1 |

Fuente: Propia

Facilidad en la instalación > Menor mantenimiento > Disponibilidad en el mercado > Costo

Tabla 17*Evaluación de las alternativas de la facilidad en la instalación*

| Facilidad en la instalación | Solución 1 | Solución 2 | Solución 3 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|--------------------|
| Solución 1 | | 1 | 1 | 3 | 0.500 |
| Solución 2 | 0 | | 1 | 2 | 0.333 |
| Solución 3 | 0 | 0 | | 1 | 0.167 |
| | | | TOTAL | 6 | 1 |

Fuente: Propia

Solución 1 > Solución 2 > Solución 3

Tabla 18*Evaluación de las alternativas para dar el menor mantenimiento*

| Menor mantenimiento | Solución 1 | Solución 2 | Solución 3 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|--------------------|
| Solución 1 | | 0.5 | 1 | 1.5 | 0.500 |
| Solución 2 | 0.5 | | 0 | 0.5 | 0.167 |
| Solución 3 | 0 | 1 | | 1 | 0.333 |
| | | | TOTAL | 3 | 1 |

Fuente: Propia

Solución 1 > Solución 3 > Solución 2

Tabla 19*Evaluación de las alternativas para disponibilidad en el mercado*

| Disponibilidad en el mercado | Solución 1 | Solución 2 | Solución 3 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|------------------------------|------------|------------|--------------|------------|-------------|
| Solución 1 | | 1 | 0.5 | 2.5 | 0.417 |
| Solución 2 | 0 | | 0.5 | 1.5 | 0.250 |
| Solución 3 | 0.5 | 0.5 | | 2 | 0.333 |
| | | | TOTAL | 6 | 1 |

Fuente: Propia

Solución 1 > Solución 3 > Solución 2

Tabla 20*Evaluación de las alternativas para el costo*

| Costo | Solución 1 | Solución 2 | Solución 3 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|-------------------|------------|------------|--------------|------------|-------------|
| Solución 1 | | 0.5 | 1 | 2.5 | 0.417 |
| Solución 2 | 0.5 | | 0.5 | 2 | 0.333 |
| Solución 3 | 0 | 0.5 | | 1.5 | 0.250 |
| | | | TOTAL | 6 | 1 |

Fuente: Propia

Solución 1 > Solución 2 > Solución 3

Tabla 21*Selección de la solución*

| | Facilidad en la instalación | Menor mantenimiento | Disponibilidad en el mercado | Costo | Σ | Porcentaje |
|-------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------------|-------|----------|------------|
| Solución 1 | 0.175 | 0.150 | 0.083 | 0.063 | 0.471 | 47% |
| Solución 2 | 0.117 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.267 | 27% |
| Solución 3 | 0.058 | 0.100 | 0.067 | 0.038 | 0.263 | 26% |

Fuente: Propia

Para el primer módulo de acuerdo al análisis de priorización que se observa en las tablas, la opción seleccionada es la solución número uno correspondiente a una sujeción de materia prima

con plato de tres garras, un mecanismo de tornillo para el cuarto eje y como herramienta del husillo se usarán fresas modulares.

3.5. Módulo 2: Teach Pendant

Este módulo corresponde al diseño y elaboración del Teach Pendant, tanto las partes de control como el diseño de la carcasa y la HMI. Las funciones que conforman este subsistema son: selección del controlador, interpretador de código G, el interfaz humano máquina y el diseño de la carcasa.

3.5.1. Selección del controlador (Módulo 2: Teach Pendant)

Un controlador es un dispositivo encargado de automatizar mediante programación de un prototipo. Se ocupa de realizar varias funciones fundamentales para el sistema, medir y regular diferentes parámetros como: nivel, temperatura, posición, caudal, presión, entre otros. En la Tabla 22 se analizan las soluciones planteadas para esta función.

Tabla 22
Soluciones planteadas para selección del controlador

| Soluciones | Ventajas | Desventajas |
|---|--|--|
| <p>PLC</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Permite automatizar procesos • Disminuye costos • Dispositivo robusto y de uso industrial • Facilidad de programación | <ul style="list-style-type: none"> • Equipo costoso • Requiere personal capacitado en programación |
| <p>PC</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Variedad en procesadores • Pueden personalizarse • Mayor rendimiento • Memoria de gran capacidad | <ul style="list-style-type: none"> • Ocupa un espacio considerable • No es portable |

CONTINÚA →

Raspberry

- Procesador de alta capacidad
- Consume poca energía
- Bajo costo
- Tamaño reducido

- Menor memoria RAM
- Sobrecalentamiento

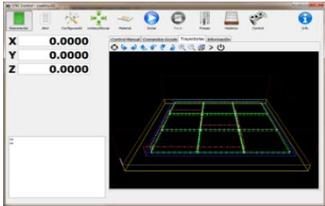
Fuente: (RaspberryPi, 2018)

3.5.2. Interpretador de código G (Módulo 2: Teach Pendant)

La selección del interpretador de código está asociada con el controlador y el sistema operativo en el que funciona. En la Tabla 23 se plantean tres posibles soluciones.

Tabla 23

Soluciones planteadas para interpretador de código G

| Soluciones | Ventajas | Desventajas |
|--|--|---|
| LinuxCNC  | <ul style="list-style-type: none"> • Se desarrolla en un software libre • Control a tiempo real • Código abierto | <ul style="list-style-type: none"> • Inestable • Requiere un computador como controlador |
| PyCNC  | <ul style="list-style-type: none"> • Código en lenguaje de alto nivel • Modificable • Sistema de seguridad interno • Funciona en tiempo real | <ul style="list-style-type: none"> • No posee HMI • Funciona para ciertos equipos |
| CncControl  | <ul style="list-style-type: none"> • Controla los límites de la máquina • Funciona en varios sistemas operativos • Robusto | <ul style="list-style-type: none"> • No funciona en tiempo real • No tiene código abierto |

Fuente: (Khabarov, 2018)

3.5.3. Interfaz humano máquina (HMI) (Módulo 2: Teach Pendant)

Para el diseño de la HMI se tomó como única solución el diseño que se muestra en la Figura 19, que tiene la arquitectura y normas necesarias para una máquina CNC de 4 ejes. Las ventanas diseñadas corresponden al mando manual y automático, en la parte manual el usuario puede modificar el avance, la velocidad del husillo y la posición de los ejes XYZ. En cambio, la ventana del mando automático permite cargar y ejecutar un programa ingresado previamente al sistema por USB. También cuenta con una ventana correspondiente al cero de pieza colocada tanto para la parte manual como automática, donde se posicionan los ejes XYZ antes de correr el código.



Figura 19. HMI del Teach Pendant

Fuente: Propia

3.5.4. Diseño de la carcasa (Módulo 2: Teach Pendant)

La carcasa del Teach Pendant es diseñada de forma única con los elementos necesarios para permitir al usuario un correcto manejo de la fresadora. El diseño escogido se muestra en la Figura 20 y muestra la distribución estratégica de los componentes eléctricos de tal forma que el operario pueda utilizar el dispositivo sin dificultad. Los elementos que componen al Teach Pendant son el switch con llave, el paro de emergencia, el puerto USB, el teclado y la pantalla táctil para navegar en la HMI.



Figura 20. Diseño de carcasa del Teach Pendant

Fuente: Propia

Para el módulo 2 se plantean las siguientes soluciones:

Tabla 24

Planteamiento de las soluciones para el Módulo 2: Teach Pendant

| Módulo 2: teach pendant | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Funciones | Solución 1 | Solución 2 | Solución 3 |
| Selección de controlador | - PLC | - PC | - Raspberry |
| Interpretador del código G | -CncControl | - LinuxCNC | - PyCNC |
| Interfaz humano máquina (HMI) | | - Normas Gedis | |
| Diseño de carcasa | | - Impresión 3D | |

Fuente: Propia

Tabla 25

Evaluación de cada criterio

| | Robustez | Rápida transmisión de datos | Menor mantenimiento | Costo | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|------------------------------------|-----------------|------------------------------------|----------------------------|--------------|------------|--------------------|
| Robustez | | 0.5 | 1 | 1 | 3.5 | 0.35 |
| Rápida transmisión de datos | 0.5 | | 1 | 1 | 3.5 | 0.35 |

CONTINÚA →

| | | | | | | |
|----------------------------|---|---|-----|--------------|-----------|----------|
| Menor mantenimiento | 0 | 0 | | 0.5 | 1.5 | 0.15 |
| Costo | 0 | 0 | 0.5 | | 1.5 | 0.15 |
| | | | | TOTAL | 10 | 1 |

Fuente: Propia

Robustez = Rápida transmisión de datos > Menor mantenimiento = Costo

Tabla 26

Evaluación de las alternativas para una rápida transmisión de datos

| Rápida transmisión de datos | Solución 1 | Solución 2 | Solución 3 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|--------------------|
| Solución 1 | | 1 | 0.5 | 2.5 | 0.417 |
| Solución 2 | 0 | | 0 | 1 | 0.167 |
| Solución 3 | 0.5 | 1 | | 2.5 | 0.417 |
| | | | TOTAL | 6 | 1 |

Fuente: Propia

Solución 1 = Solución 3 > Solución 2

Tabla 27

Evaluación de las alternativas para dar un menor mantenimiento

| Menor mantenimiento | Solución 1 | Solución 2 | Solución 3 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|--------------------|
| Solución 1 | | 1 | 0 | 2 | 0.333 |
| Solución 2 | 0 | | 0.5 | 1.5 | 0.250 |
| Solución 3 | 1 | 0.5 | | 2.5 | 0.417 |
| | | | TOTAL | 6 | 1 |

Fuente: Propia

Solución 3 > Solución 1 > Solución 2

Tabla 28

Evaluación de las alternativas para el costo

| Costo | Solución 1 | Solución 2 | Solución 3 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|--------------------|
| Solución 1 | | 0 | 0 | 1 | 0.167 |
| Solución 2 | 1 | | 0.5 | 2.5 | 0.417 |
| Solución 3 | 1 | 0.5 | | 2.5 | 0.417 |
| | | | TOTAL | 6 | 1 |

Fuente: Propia

Solución 2 = Solución 3 > Solución 1

Tabla 29
Selección de la solución

| | Robustez | Rápida transmisión de datos | Menor mantenimiento | Costo | Σ | Porcentaje |
|-------------------|-----------------|--|--------------------------------|--------------|----------|-------------------|
| Solución 1 | 0.146 | 0.146 | 0.050 | 0.025 | 0.367 | 37% |
| Solución 2 | 0.058 | 0.058 | 0.038 | 0.063 | 0.217 | 22% |
| Solución 3 | 0.146 | 0.146 | 0.063 | 0.063 | 0.417 | 42% |

Fuente: Propia

Para el Módulo 2 de acuerdo al análisis de priorización que se observa en las Tablas, la opción idónea es la Solución 3 correspondiente a utilizar una tarjeta Raspberry como controlador y PyCNC como interpretador de código G. También pertenecen a este subsistema, el interfaz humano máquina (HMI) y la carcasa diseñados para las cumplir las funciones necesarias de la máquina.

3.6. Módulo 3: Sistema electrónico

Este módulo abarca toda la parte electrónica de la máquina, está compuesta del diseño de las placas para los circuitos, además por la selección del motor, selección de fuentes y la seguridad redundante para evitar colisiones.

3.6.1. Selección del motor (Módulo 3: Sistema electrónico)

Para la correcta selección de motor es necesario tomar en cuenta los tipos de motores más utilizados en máquinas CNC, es así que se tienen las opciones mostradas en la Tabla 30.

Tabla 30
Soluciones planteadas para selección del motor

| Soluciones | Ventajas | Desventajas |
|---|---|--|
| <p>Motor a pasos</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Larga vida útil • Confiable. • El paso genera un error de menos del 5%. • Excelente funcionamiento en arranque y parada. • Destacada repetibilidad. | <ul style="list-style-type: none"> • Al requerir un alto rendimiento se calienta • A altas velocidades es ruidoso. |
| <p>Servomotor</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Alta precisión • Bajo consumo de energía • Torque elevado | <ul style="list-style-type: none"> • Difícil de controlar • Costoso |

Fuente: (AMCI, 2016)

- **Cálculos del torque del motor**

El torque máximo necesario para mover el cabezal divisor es el valor correspondiente al torque del motor. Para esto, se calcula el valor de forma experimental, utilizando un dinamómetro digital que mide el peso del diferencial en Nm. El valor obtenido corresponde al torque de entrada al sistema, este es igual a: $\tau_{in} = 2.7 \text{ Nm}$. Al aplicar la relación del mecanismo tornillo sin fin de 40:1, se obtiene un torque de salida de: $\tau_{out} = 108 \text{ Nm}$, este corresponde al valor del torque que el motor necesita para dar movimiento al eje rotacional.

El motor seleccionado es un motor a pasos nema 34 con un torque de entrada de $\tau_{in} = 8.7 \text{ Nm}$ y que multiplicado con la relación 40:1, da un torque de salida $\tau_{out} = 348 \text{ Nm}$. El actuador seleccionado permite romper la inercia inicial para generar el movimiento del eje rotacional junto con la pieza a maquinar.

3.6.2. Seguridad redundante (Módulo 3: Sistema electrónico)

La seguridad redundante es un circuito diseñado para prevenir la mayor cantidad de errores posibles en el uso de la máquina, su diseño se observa en la Figura 21. Este sistema verifica los límites de trabajo en los 4 ejes y cancela la orden en caso de que puedan provocar un daño irreparable en los actuadores que accionan los ejes. En la Tabla 31 se analizan las ventajas y desventajas que tiene este circuito

Tabla 31

Solución plateada para la seguridad redundante

| Solución | Ventajas | Desventajas |
|---|--|---|
| <p>Conexión en paralelo</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Protección contra colisiones • Marca límites del área de trabajo • Verifica el código G antes de ser ejecutado | <ul style="list-style-type: none"> • Para su desarrollo requiere conocimientos de electrónica avanzada |

Fuente: Propia

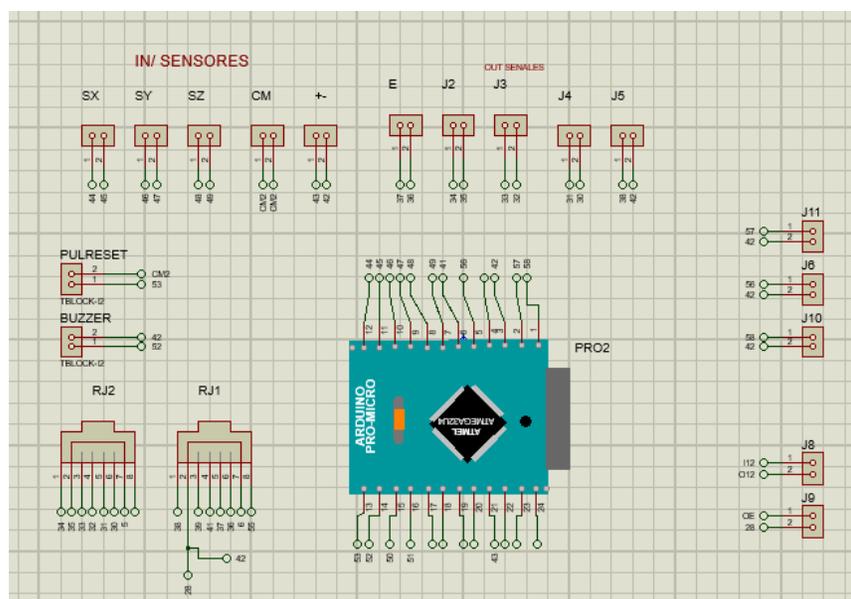


Figura 21. Circuito de seguridad redundante diseñado

Fuente: Propia

- **Cálculo para el ancho de la pista para el circuito de seguridad**

El circuito de seguridad se encarga de emitir una señal auditiva y visual, cuando se genera colisión en los ejes X, Y, o Z. Para realizar el circuito correspondiente es necesario calcular el ancho de la pista considerando la ecuación y los parámetros siguientes: (Pareja, 2010)

$$\text{Ancho de pista} = \frac{\left(\frac{I}{k_1 \times \Delta T k_2}\right)^{\frac{1}{k_3}}}{L \times 1,378} \quad (20)$$

Corriente máxima: $I = 5A$

Incremento máximo de temperatura: $\Delta T = 15\text{ }^\circ\text{C}$

Grosor de la capa de pista: $L = 35\text{ micras}$

Al ser una pista externa los valores de las constantes son: $k_1 = 0.0647$, $k_2 = 0.4281$, $k_3 = 0.6732$. Se obtuvo como resultado un Ancho de pista = 2,363 mil (milésimas de pulgada).

3.6.3. *Electrónica del sistema (Módulo 3: Sistema electrónico)*

Los circuitos que conforman la parte electrónica del Teach Pendant pertenecen a la conexión teclado que se muestra en la Figura 22 y puertos GPO de la Raspberry Pi2 que se observa en la Figura 23. Las dos placas se energizan con un voltaje de 5V, por lo tanto, el cálculo del ancho de la pista va a ser el mismo.

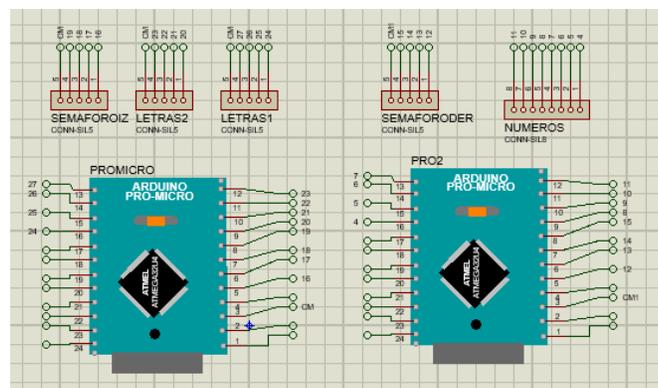


Figura 22. Circuito para la conexión del teclado

Fuente: Propia

- **Cálculo del ancho de la pista para los circuitos del teclado, puertos GPO y etapa de potencia**

Se aplica la ecuación 20 con los parámetros pertenecientes a este caso:

Corriente máxima: $I = 3 \text{ A}$

Incremento máximo de temperatura: $\Delta T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$

Grosor de la capa de pista: $L = 35 \text{ micras}$

Al ser una pista externa los valores de las constantes son: $k_1 = 0.0647$, $k_2 = 0.4281$, $k_3 = 0.6732$. Se obtuvo como resultado un Ancho de pista = 1.106 mil.

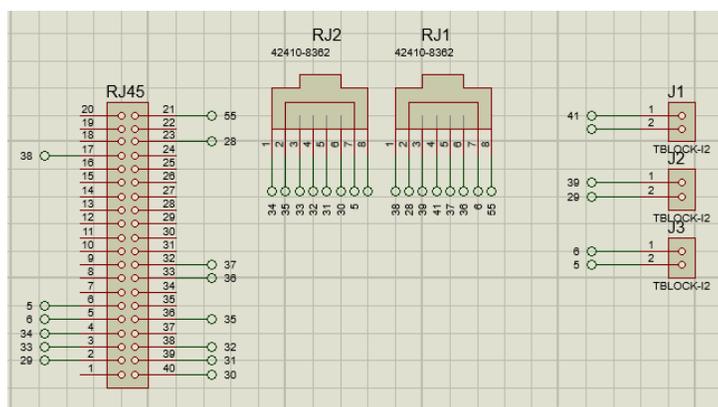


Figura 23. Circuito para la conexión del teclado
Fuente:Propia

A continuación, se plantean las soluciones para el módulo 3: Sistema electrónico.

Tabla 32

Planteamiento de las soluciones para el Módulo 3: Sistema electrónico

| MÓDULO 3: SISTEMA ELECTRÓNICO | | |
|--------------------------------------|------------------------|-------------------|
| Funciones | Solución 1 | Solución 2 |
| Selección del motor | - Motor a pasos | - Servomotor |
| Seguridad redundante | - Conexión en paralelo | |
| Electrónica del sistema | - Diseño de circuitos | |

Fuente: Propia

Tabla 33*Evaluación de cada criterio*

| | Precisión | Disponibilidad en el mercado | Costo | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|-------------------------------------|------------------|-------------------------------------|--------------|------------|--------------------|
| Precisión | | 1 | 1 | 3 | 0.50 |
| Disponibilidad en el mercado | 0 | | 0.5 | 1.5 | 0.25 |
| Costo | 0 | 0.5 | | 1.5 | 0.25 |
| | | | TOTAL | 6 | 1 |

Fuente: Propia

Precisión > Disponibilidad en el mercado = Costo

Tabla 34*Evaluación de las alternativas para la precisión*

| Precisión | Solución 1 | Solución 2 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|-------------------|-------------------|-------------------|------------|--------------------|
| Solución 1 | | 1 | 2 | 0.667 |
| Solución 2 | 0 | | 1 | 0.333 |
| | | | 3 | 1 |

Fuente: Propia

Solución 1 > Solución 2

Tabla 35*Evaluación de las alternativas para la disponibilidad en el mercado*

| Disponibilidad en el mercado | Solución 1 | Solución 2 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------|------------|--------------------|
| Solución 1 | | 1 | 2 | 0.667 |
| Solución 2 | 0 | | 1 | 0.333 |
| | | | 3 | 1 |

Fuente: Propia

Solución 1 > Solución 2

Tabla 36*Evaluación de las alternativas para el costo*

| Costo | Solución 1 | Solución 2 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|-------------------|-------------------|-------------------|------------|--------------------|
| Solución 1 | | 1 | 2 | 0.667 |
| Solución 2 | 0 | | 1 | 0.333 |
| | | | 3 | 1 |

Fuente: Propia

Solución 1 > Solución 2

Tabla 37
Selección de la solución

| | Precisión | Disponibilidad en el mercado | Costo | Σ | Porcentaje |
|-------------------|------------------|---|--------------|----------|-------------------|
| Solución 1 | 0.333 | 0.167 | 0.167 | 0.667 | 67% |
| Solución 2 | 0.167 | 0.083 | 0.083 | 0.333 | 33% |

Fuente: Propia

La solución idónea para el tercer módulo es implementar en el cuarto eje un motor a pasos con su respectivo driver y fuente. Además, los circuitos correspondientes a la seguridad redundante, la conexión del teclado y puertos GPO.

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

El siguiente capítulo contiene la implementación de las soluciones escogidas correspondientes a los módulos de la fresadora Bridgeport CNC de 4 ejes. También explica las pruebas pertinentes, el análisis de las mismas y los resultados alcanzados acorde a los objetivos del proyecto.

4.1. Implementación

4.1.1. Implementación de base y acople para el motor del cuarto eje

Para instalar la parte mecánica del cuarto eje, se coloca acople que une el motor a pasos al cabezal divisor de la fresadora. Además, se elabora una base como soporte de todo el sistema y se fija a la mesa con pernos. La Figura 24 muestra el resultado final del montaje.



Figura 24. Cuarto eje de la fresadora Bridgeport
Fuente: Propia

4.1.2. Instalación del driver y la fuente para el motor del cuarto eje

El motor a pasos del eje rotacional requiere para su funcionamiento un driver y una fuente. Estos fueron instalados junto con los dispositivos del proyecto anterior como se observa en la Figura 25.



Figura 25. Driver y fuente del motor a pasos instalados
Fuente: Propia

4.1.3. Desarrollo de placas electrónicas del Teach Pendant y seguridad redundante

Las placas electrónicas del Teach Pendant y la seguridad se elaboraron de acuerdo a las necesidades cada función. La primera placa corresponde a la conexión de los puertos GPIO de la tarjeta de control Raspberry, la segunda contiene el circuito de los botones y el teclado del Teach Pendant y la tercera corresponde a la seguridad redundante, a este se conectan los actuadores de los cuatro ejes y las señales para el control. Cuenta con un bloqueo de fines carrera en los recorridos máximos de la fresadora y una alerta sonora. Además, para el desbloqueo de este estado cuenta con un botón. En la Figura 26 se muestra los circuitos del Teach Pendant.

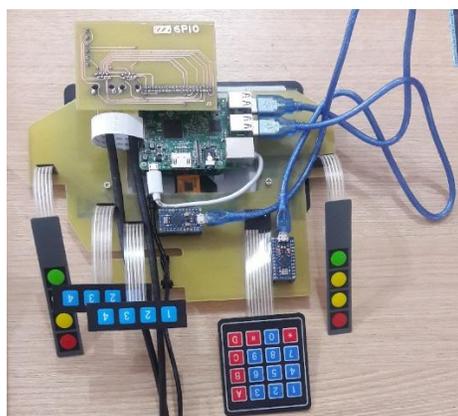


Figura 26. Placas electrónicas del Teach Pendant
Fuente: Propia

4.1.4. Instalación de placa electrónica de la seguridad redundante

La conexión de la seguridad se coloca de forma independiente al Teach Pendant junto con los conectores para el controlador, en la Figura 27 se ilustra el proceso de la instalación.



Figura 27. Conexión de la placa electrónica de la seguridad redundante
Fuente: Propia

4.1.5. Diseño e impresión de carcasa del Teach Pendant

El diseño del Teach Pendant se realiza basado en dispositivos de mando de robots industriales. También, se considera un tamaño de la carcasa adaptable para varios usuarios y una distribución de los botones que facilite la comprensión del operador. El proceso de la impresión 3D de la estructura se muestra en la Figura 28.

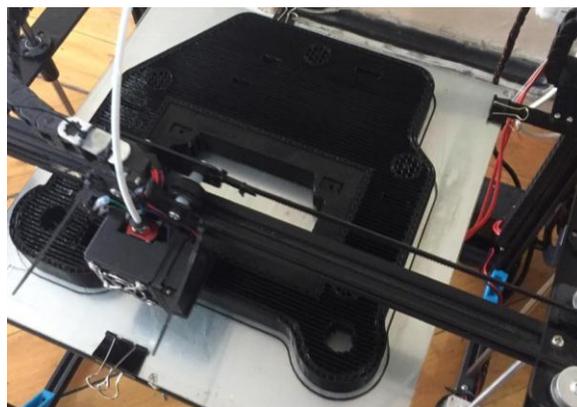


Figura 28. Impresión de la carcasa del Teach Pendant
Fuente: Propia

4.1.6. Montaje de Teach Pendant

Una vez impresa la carcasa tanto la cara superior como la inferior, se colocan el switch de accionamiento con llave, paro de emergencia, pantalla, controlador y placas electrónicas como se observa en la Figura 29.

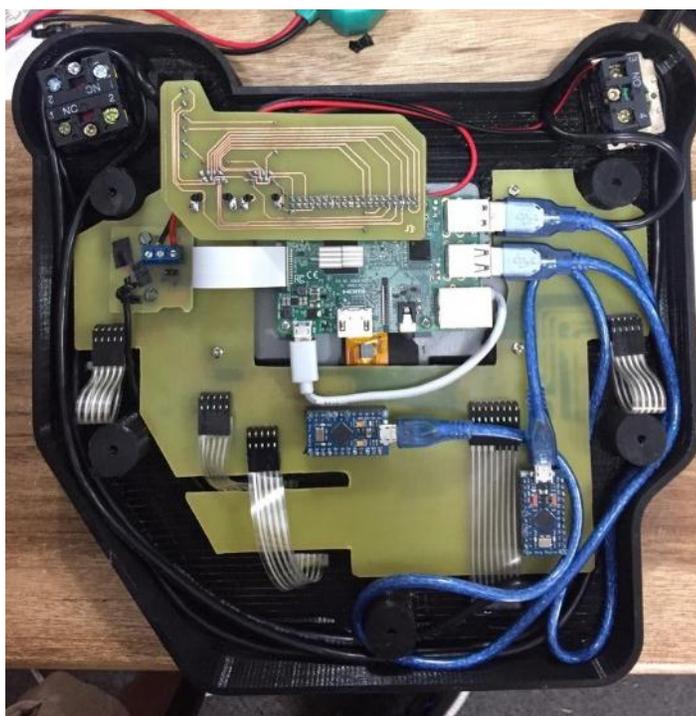


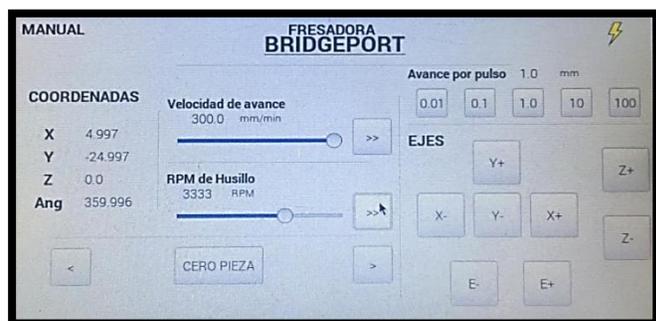
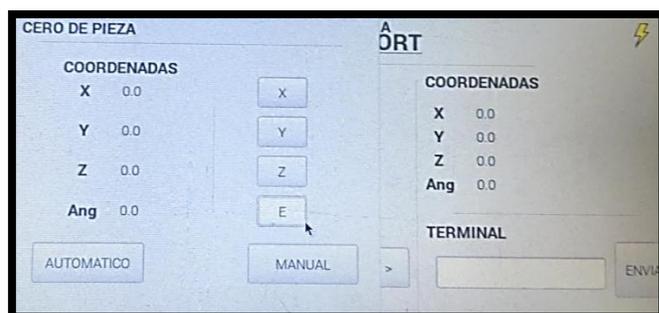
Figura 29. Instalación de placas electrónicas
Fuente: Propia

4.1.7. Diseño de la HMI del Teach Pendant

Para el diseño de la interfaz gráfica se busca interactuar con el operario de una forma intuitiva y clara. La guía GEDIS permite realizar una distribución correcta de los elementos en las ventanas. En la Tabla 38 se explica el funcionamiento y la interacción de las ventanas del HMI.

Tabla 38
Funcionamiento HMI del Teach Pendant

Ventana



Funcionamiento

Ventana principal:

- Muestra la posición actual de la herramienta.
- Da acceso a las ventanas para colocar el cero de pieza y para cargar un programa.
- Permite ejecutar el código cargado
- Envía el código G
- Indica los parámetros de fresado

Ventana del cero de pieza:

- Permite mover los ejes a la posición requerida y colocar el cero de pieza.

Ventana para mando automático

- Enlista los archivos de texto .txt disponibles en la base de datos.
- Carga el código seleccionado
- Indica los parámetros de fresado escogidos.
- Muestra todas las líneas de código en el momento de su ejecución.

Ventana para mando manual

- Indica la posición de la herramienta
- Permite insertar velocidad de avance y RPM del husillo
- Permite seleccionar el avance por pulsos.
- Acciona en sentido positivo o negativo los 4 ejes.

- Hilo de Registros: En esta programación se implementa el uso de registros de comandos ingresados e interpretados por el terminal de ubuntu. También, se guardan registros de posicionamiento, avance de motores, velocidad del husillo, así como alertas, errores o estados de la fresadora. Los registros se encuentran organizados en carpetas mediante el uso de archivos de texto autogenerados.
- Hilo de comunicación PyCNC: En este hilo de programación se cuenta con la conexión del interpretador de código G previamente modificado a las necesidades de la fresadora Bridgeport, a las salidas GPIO de la Raspberry teniendo en cuenta los parámetros electrónicos.
- Hilo HMI: Este hilo cuenta con la generación y despliegue de la interfaz gráfica que permitirá la mejor manipulación de los parámetros de la fresadora con el usuario que la opere.
- Hilo de velocidad del husillo: A fin de obtener mayor estabilidad en la señal de la velocidad del husillo, se diseña un control en paralelo que maneja únicamente la velocidad del husillo a fin eliminar errores de caídas de voltaje en la señal PWM del husillo.
- Hilo de lectura de archivos de código G: Se cuenta con una conexión en la base de archivos de código G, los cuales se inspecciona línea por línea y envía al interpretador de código G.
- Hilo de control Manual: Este control maneja internamente coordenadas y código G, los usuarios no dependen del uso de la programación de las coordenadas. Se tiene el control del avance en milímetros por minuto, la velocidad del husillo, avance positivo y negativo

de los 4 ejes, avance por paso y validación de coordenadas de posicionamiento, así como el acceso al cero de pieza.

- Hilo de control Automático: Este hilo cuenta con la ejecución de archivos de en código G, así como la validación de coordenadas, cero de pieza y un terminal para la programación directa de código G.

4.2. Pruebas

A continuación, se indican las pruebas de calibración, tolerancias y cálculo de errores en la fresadora Bridgeport, para los procesos de fresado en cada eje. Se toma como procedimiento las pruebas recomendadas en el anterior proyecto de titulación, a fin de obtener datos técnicos y corrección de errores sobre la fresadora. El material a fresar es el aglomerado con el fin de generar mayor número de pruebas, como se observa en la Figura 31. Se realiza una pre calibración mediante el control manual en cada eje con su respectivo análisis de errores. Los datos utilizados son un avance de 138 mm/min, y una velocidad del 50% de la velocidad máxima del husillo por motivos del material a realizar las pruebas.

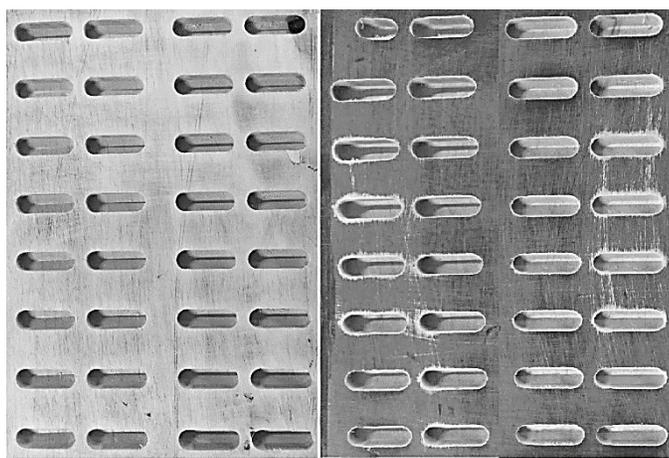


Figura 31. Prueba de calibración automático

Fuente: Propia

4.2.1. Prueba de control manual para el eje X

La prueba de control manual sirve para calibrar los pulsos por milímetro en los motores y obtener las coordenadas requeridas. Consiste en desplazar y maquinar ranuras distancias de 12 milímetros con dirección al eje X usando el mando manual, con un valor de 80.2 pulsos por milímetro en el motor del eje X. Los valores medidos se muestran en la Tabla 39.

Tabla 39

Distancias en mm para probetas del eje X

| Prueba No. | Referencial (mm) | Real (mm) | Error (mm) |
|------------|------------------|-----------|------------|
| 1 | 12 | 12.15 | 0.15 |
| 2 | 12 | 12.1 | 0.10 |
| 3 | 12 | 12.15 | 0.15 |
| 4 | 12 | 12.15 | 0.15 |
| 5 | 12 | 12.2 | 0.20 |
| Promedio | | 12.15 | 0.15 |

Fuente: Propia

Mediante la corrección de pulsos por milímetro se obtiene, 79.87 pulsos por milímetro para el valor del eje X.

4.2.2. Prueba de control manual para el eje Y

La prueba es similar a la anterior y consiste en desplazar y ranurar distancias de 38 milímetros en dirección al eje Y utilizando el control manual, con un valor de 80.2 pulsos por milímetro en el motor del eje Y. los valores mostrados en la Tabla 40.

Tabla 40

Distancias en mm para probetas del eje Y

| Prueba No. | Referencial (mm) | Real (mm) | Error (mm) |
|------------|------------------|-----------|------------|
| 1 | 38 | 38 | 0.00 |
| 2 | 38 | 37.7 | 0.30 |
| 3 | 38 | 37.65 | 0.35 |
| 4 | 38 | 37.65 | 0.35 |
| 5 | 38 | 37.6 | 0.40 |
| Promedio | | 37.72 | 0.28 |

Fuente: Propia

Mediante la corrección de pulsos por milímetro se obtiene, 82.265 pulsos por milímetro para el valor del eje Y.

4.2.3. Prueba de control manual para el eje Z

Los desplazamientos y ranuras tienen distancia de 5 milímetros en dirección al eje Z usando el control manual, con un valor de 480 pulsos por milímetro en el motor del eje Z. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 41. Mediante la corrección de pulsos por milímetro se obtiene, 456.92 pulsos por milímetro para el valor del eje Z.

Tabla 41
Distancias en mm para probetas del eje Z

| Prueba No. | Referencial mm | Real mm | Error mm |
|------------|----------------|---------|----------|
| 1 | 5 | 5.35 | 0.35 |
| 2 | 5 | 5.25 | 0.25 |
| 3 | 5 | 5.5 | 0.50 |
| 4 | 5 | 5.5 | 0.50 |
| 5 | 5 | 5.6 | 0.60 |
| Promedio | | 5.44 | 0.44 |

Fuente: Propia

4.2.4. Prueba de control manual para el eje E

La prueba consiste en rotar 360 grados el eje rotacional (E) utilizando el control manual, con un valor de 90.74 pulsos por ángulo en el motor del eje E. Las mediciones obtenidas se presentan en la Tabla 42.

Tabla 42
Distancias en grados para probetas del eje E

| Prueba No. | Referencial mm | Real mm | Error mm |
|------------|----------------|---------|----------|
| 1 | 360 | 363.9 | 3.90 |
| 2 | 360 | 360 | 0.00 |
| 3 | 360 | 353.9 | -6.10 |
| 4 | 360 | 360 | 0.00 |

CONTINÚA →

| | | | |
|----------|-----|--------|-------|
| 5 | 360 | 358.6 | -1.40 |
| Promedio | | 359.28 | -0.72 |

Fuente: Propia

Mediante la corrección de pulsos por ángulo se obtiene, 90.54 pulsos por ángulo para el valor del eje Z.

4.2.5. Control de proceso automático para el eje X

Para determinar tolerancias se genera el código G correspondiente a una matriz de 2 columnas por 8 filas, el cual se carga y ejecuta el programa para obtener ranuras y desplazamientos de fresado. Las pruebas se realizaron con un avance de 138 mm/min, y a una velocidad del 50% de la velocidad máxima del husillo. Los resultados se muestran en la Tabla 43.

Tabla 43

Distancias en mm para probetas del eje X

| Número | M1 | M2 | M3 | M4 | Prom. | Rang. |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------------|
| 1 | 16 | 16 | 16.18 | 16.1 | 16.07 | 0.07 |
| 2 | 16.1 | 16.08 | 16.1 | 16.08 | 16.09 | 0.09 |
| 3 | 16.18 | 16.1 | 16.1 | 16.1 | 16.12 | 0.12 |
| 4 | 16.02 | 16.02 | 16.08 | 16.1 | 16.06 | 0.05 |
| 5 | 16.08 | 16.16 | 16.08 | 16.1 | 16.11 | 0.10 |
| 6 | 16.1 | 16.08 | 16.1 | 16.08 | 16.09 | 0.09 |
| 7 | 16 | 16.16 | 16.1 | 16.12 | 16.10 | 0.09 |
| 8 | 16 | 16 | 16 | 16.08 | 16.02 | 0.02 |
| 9 | 16.1 | 16 | 16.06 | 16.12 | 16.07 | 0.07 |
| 10 | 16.1 | 16.08 | 16.1 | 16.12 | 16.10 | 0.10 |
| 11 | 16.06 | 16.1 | 16.16 | 16.08 | 16.10 | 0.10 |
| 12 | 16.12 | 16.02 | 16.12 | 16.04 | 16.08 | 0.08 |
| 13 | 16.08 | 16.1 | 16 | 16.06 | 16.06 | 0.06 |
| 14 | 16.08 | 16.1 | 16.08 | 16 | 16.07 | 0.06 |
| Promedio Final | | | | | 16.08 | 0.08 |

Fuente: Propia

Los valores encontrados corresponden a una distancia programada de 16 mm en el eje X mediante código G.

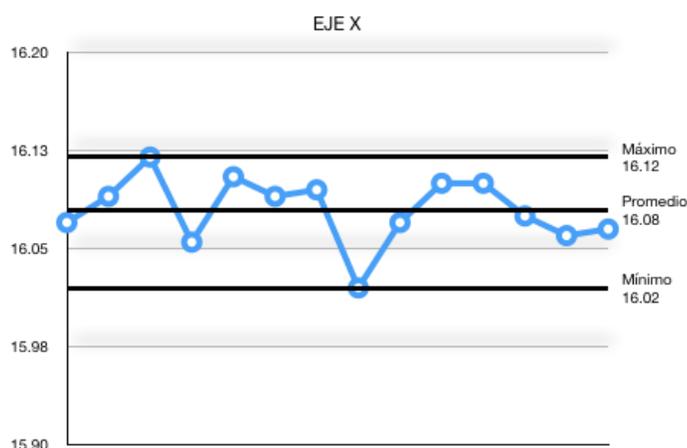


Figura 32. Prueba de desplazamiento en X

Fuente: Propia

Las Figura 32 corresponde al valor promedio y la Figura 33 al rango encontrados en el eje X. Se observa que los valores se encuentran dentro de los rangos propuestos de tolerancia de $\pm 0.1\text{mm}$.

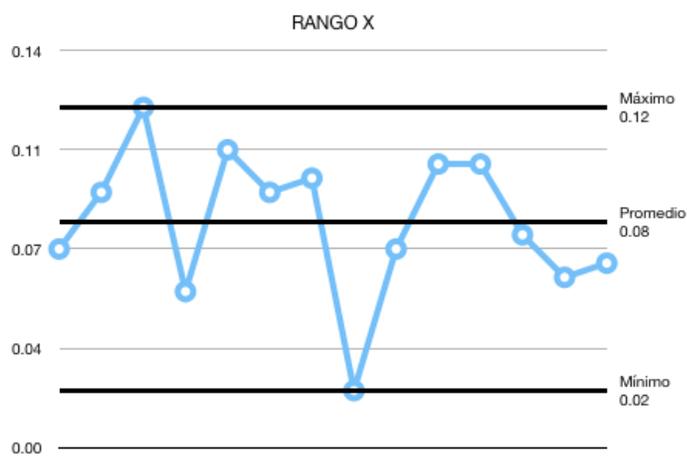


Figura 33. Rango de desplazamiento en X

Fuente: Propia

4.2.6. Control de proceso automático para el eje Y

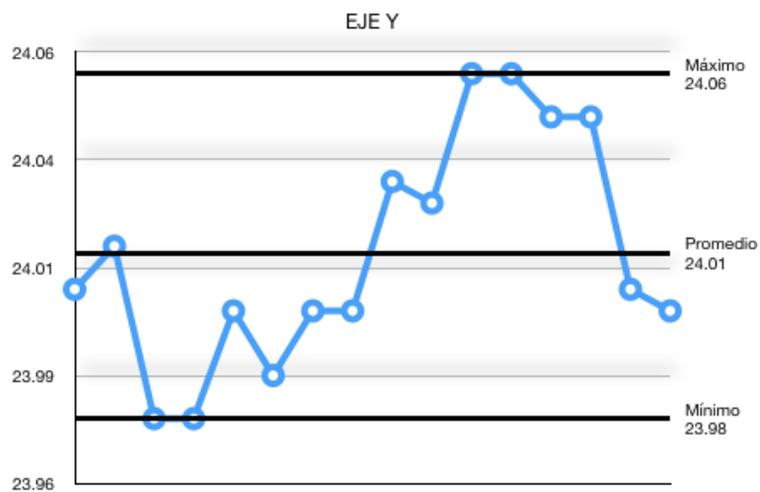
La prueba es similar a la anterior pero los valores encontrados corresponden a una distancia programada de 24 mm en el eje Y mediante código G. Datos que se muestran en la Tabla 44.

Tabla 44

Distancias en mm para probetas del eje Y

| Número | M1 | M2 | M3 | M4 | Prom. | Rang. |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------------|
| 1 | 24 | 24.02 | 24 | 24 | 24.01 | 0.00 |
| 2 | 24 | 24 | 23.96 | 24.1 | 24.02 | 0.02 |
| 3 | 24 | 24 | 23.9 | 24 | 23.98 | 0.02 |
| 4 | 24 | 24 | 23.9 | 24 | 23.98 | 0.02 |
| 5 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24.00 | 0.00 |
| 6 | 24 | 24 | 23.94 | 24 | 23.99 | 0.02 |
| 7 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24.00 | 0.00 |
| 8 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24.00 | 0.00 |
| 9 | 24.08 | 24.02 | 24 | 24.02 | 24.03 | 0.03 |
| 10 | 24.08 | 24.02 | 23.96 | 24.04 | 24.03 | 0.02 |
| 11 | 24.1 | 24.1 | 24 | 24.02 | 24.06 | 0.05 |
| 12 | 24.1 | 24.1 | 24 | 24.02 | 24.06 | 0.05 |
| 13 | 24.08 | 24.1 | 24 | 24 | 24.05 | 0.05 |
| 14 | 24.08 | 24 | 24.02 | 24.08 | 24.05 | 0.04 |
| 15 | 24.02 | 24 | 24 | 24 | 24.01 | 0.00 |
| 16 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24.00 | 0.00 |
| Promedio Final | | | | | 24.02 | 0.02 |

Fuente: Propia

**Figura 34.** Prueba de desplazamiento en el eje Y

Fuente: Propia

La Figura 34 corresponde al valor promedio y la Figura 35 al rango de desplazamiento encontrados en el eje Y. Se observa que los valores se encuentran dentro de los rangos propuestos de tolerancia de ± 0.1 mm.

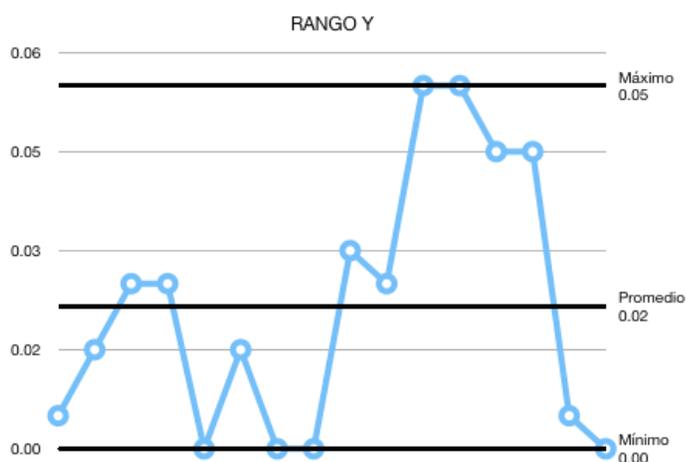


Figura 35. Rango de desplazamiento en Y

Fuente: Propia

4.2.7. Control de proceso automático para el eje Z

La prueba es similar a la anterior pero los valores encontrados corresponden a una distancia programada de 5 mm en el eje Z mediante código G. Estos datos se observan en la Tabla 45.

Tabla 45

Distancias en mm para las probetas del eje Z

| Número | M1 | M2 | M3 | M4 | Prom. | Rang. |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------------|
| 1 | 24 | 24.02 | 24 | 24 | 24.01 | 0.00 |
| 2 | 24 | 24 | 23.96 | 24.1 | 24.02 | 0.02 |
| 3 | 24 | 24 | 23.9 | 24 | 23.98 | 0.02 |
| 4 | 24 | 24 | 23.9 | 24 | 23.98 | 0.02 |
| 5 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24.00 | 0.00 |
| 6 | 24 | 24 | 23.94 | 24 | 23.99 | 0.02 |
| 7 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24.00 | 0.00 |
| 8 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24.00 | 0.00 |
| 9 | 24.08 | 24.02 | 24 | 24.02 | 24.03 | 0.03 |
| 10 | 24.08 | 24.02 | 23.96 | 24.04 | 24.03 | 0.02 |
| 11 | 24.1 | 24.1 | 24 | 24.02 | 24.06 | 0.05 |
| 12 | 24.1 | 24.1 | 24 | 24.02 | 24.06 | 0.05 |
| 13 | 24.08 | 24.1 | 24 | 24 | 24.05 | 0.05 |
| 14 | 24.08 | 24 | 24.02 | 24.08 | 24.05 | 0.04 |
| 15 | 24.02 | 24 | 24 | 24 | 24.01 | 0.00 |
| 16 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24.00 | 0.00 |
| Promedio Final | | | | | 24.02 | 0.02 |

Fuente: Propia

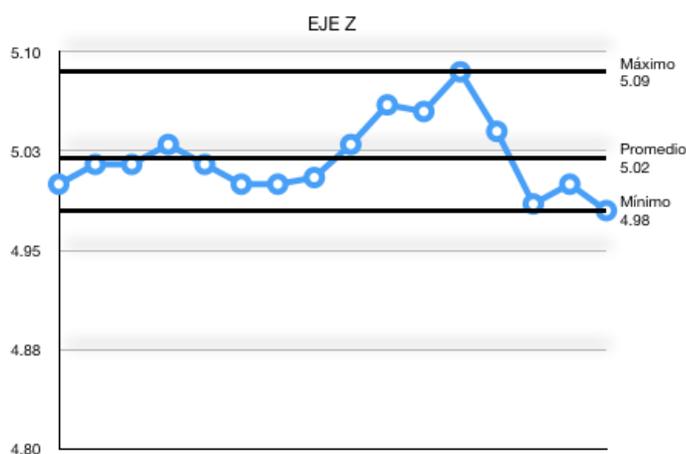


Figura 36. Prueba de desplazamiento en Z

Fuente: Propia

La Figura 32 corresponde al valor promedio y la Figura 33 al rango de desplazamiento encontrado en el eje Z. Se observa que los valores se encuentran dentro de los rangos propuestos de tolerancia de ± 0.1 mm.

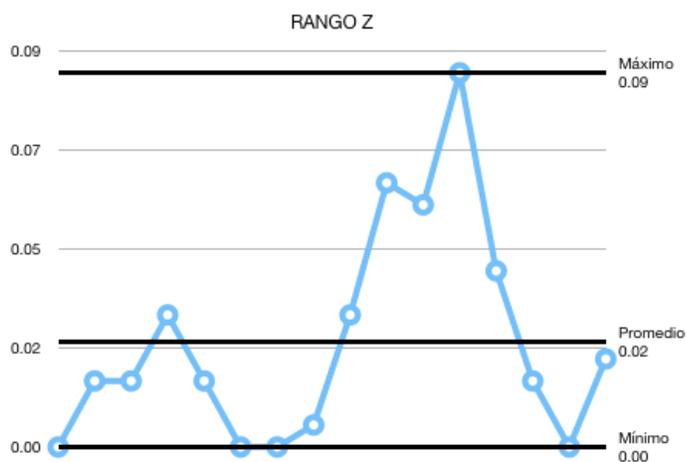


Figura 37. Rango de desplazamiento en X

Fuente: Propia

4.2.8. Control de proceso automático eje E

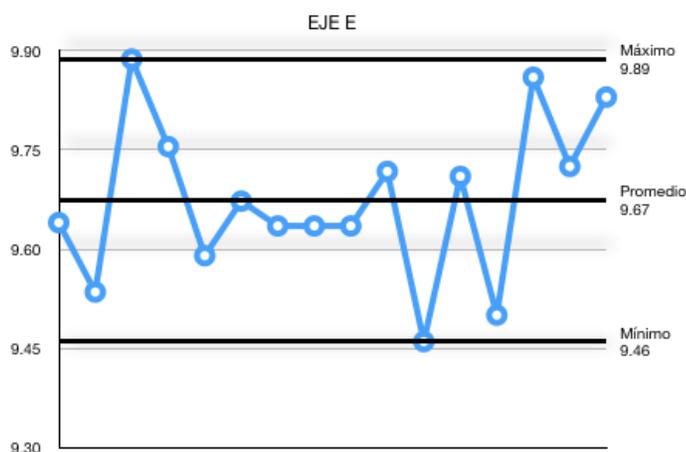
Se analizan las distancias en grados para las probetas del eje rotacional, los valores encontrados corresponden a una distancia programada de 9.6 grados en el eje E mediante código G. Estos datos se muestran en la Tabla 46.

Tabla 46

Distancias en grados para las probetas del eje E

| Número | M1 | M2 | M3 | M4 | Promedio | Error |
|-----------------------|-------|-------|-------|------|-------------|-------------|
| 1 | 9.43 | 9.47 | 9.95 | 9.71 | 9.64 | 0.14 |
| 2 | 9.53 | 9.31 | 9.59 | 9.71 | 9.54 | 0.04 |
| 3 | 10.37 | 9.31 | 9.98 | 9.89 | 9.89 | 0.39 |
| 4 | 9.95 | 9.29 | 9.89 | 9.89 | 9.76 | 0.25 |
| 5 | 9.59 | 9.29 | 9.59 | 9.89 | 9.59 | 0.09 |
| 6 | 10.01 | 9.29 | 9.71 | 9.68 | 9.67 | 0.17 |
| 7 | 9.89 | 9.29 | 9.68 | 9.68 | 9.64 | 0.14 |
| 8 | 8.99 | 9.89 | 9.98 | 9.68 | 9.64 | 0.14 |
| 9 | 8.99 | 9.59 | 10.28 | 9.68 | 9.64 | 0.14 |
| 10 | 9.89 | 9.71 | 9.59 | 9.68 | 9.72 | 0.22 |
| 11 | 8.96 | 9.68 | 9.31 | 9.89 | 9.46 | 0.04 |
| 12 | 10.28 | 9.98 | 9.29 | 9.29 | 9.71 | 0.21 |
| 13 | 9.59 | 9.59 | 9.53 | 9.29 | 9.50 | 0.00 |
| 14 | 9.59 | 10.19 | 10.37 | 9.29 | 9.86 | 0.36 |
| 15 | 9.98 | 9.98 | 9.47 | 9.47 | 9.73 | 0.23 |
| 16 | 10.19 | 10.19 | 9.47 | 9.47 | 9.83 | 0.33 |
| Promedio Final | | | | | 9.66 | 0.17 |

Fuente: Propia

**Figura 38.** Prueba de desplazamiento angular para el eje E

Fuente: Propia

Las gráficas corresponden al valor promedio que se observa la Figura 38 y rango encontrados en el eje E que se muestra en la Figura 39. Se observa que los valores encontrados se encuentran dentro de los rangos propuestos de tolerancia de ± 0.8 grados siendo el valor máximo 0.39 grados de error.

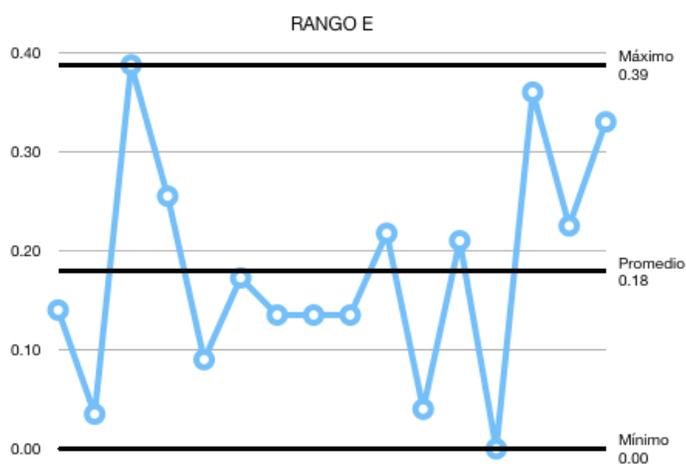


Figura 39. Rango de desplazamiento eje E
Fuente: Propia

4.2.9. Prueba de funcionamiento del interpretador de código G

Las siguientes pruebas tienen como finalidad el verificar el funcionamiento del interpretador de código G. La prueba aplica para los tres ejes XYZ. Para la calibración se utiliza la trayectoria mostrada en la Figura 40, cuya programación consta en los Anexos.

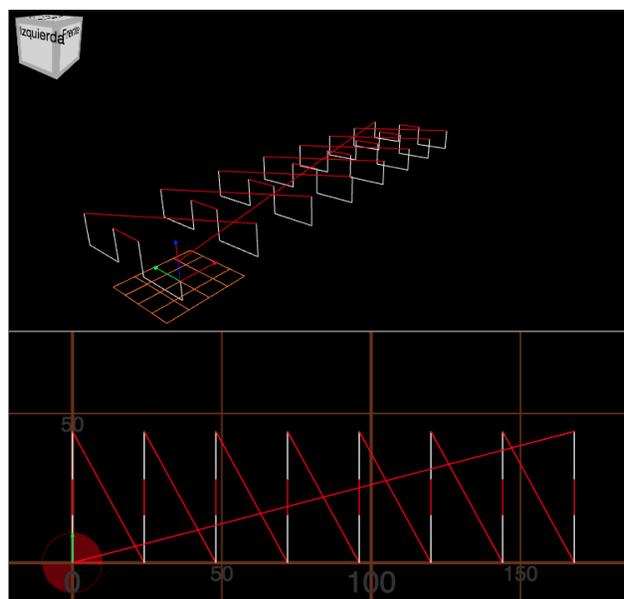


Figura 40. Simulación del código G para las pruebas de precisión
Fuente: Propia

En la Figura 41 se muestra un ejemplo de trayectoria programada en software libre online y replicadas en la fresadora Bridgeport. Obteniendo de esta forma trayectorias de interpolación lineal y circular.

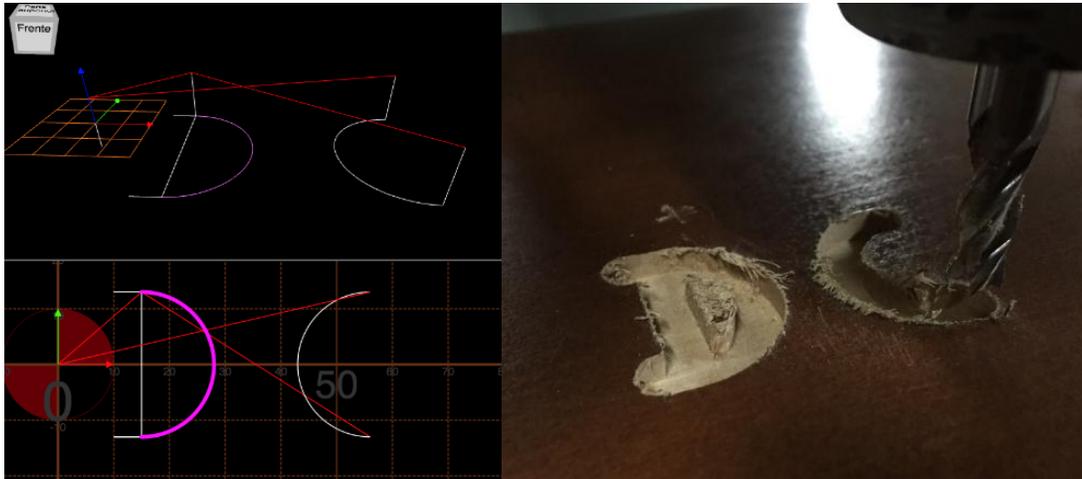


Figura 41. Simulación del código G para maquinado de letras

Fuente: Propia

4.2.10. Pruebas de engranes

En las siguientes pruebas se realizaron engranes mediante el uso del generador de código G programado para la fresadora Bridgeport, a fin de obtener engranes rectos, engranes helicoidales izquierdos y derechos. Los materiales usados para las pruebas fueron duralón y aluminio.

Para lo cual se inicia en la interfaz de generación de código G que se observa en la Figura 42, para el diseño de engranes ingresando los siguientes parámetros, así como avances, velocidad de husillo, y rangos de seguridad. Obteniendo así un archivo de código G para la manufactura de engranes.

Para el diseño de los engranes rectos se utilizan los parámetros que se indican en la Tabla 47.

Obteniendo así engranes rectos con simetría en sus dientes como se observa en la Figura 44.

Tabla 47

Parámetros de diseños para engrane recto

| Diámetro exterior | 20mm |
|--------------------------|-------------|
| <i>Módulo</i> | 1-2 |
| <i>Material</i> | Duralón |
| <i>Número de dientes</i> | 13-34 |
| <i>Ángulo helicoidal</i> | 0 |
| <i>Avance mm/min</i> | 300 |
| <i>RPM husillo</i> | 2000 |

Fuente: Propia

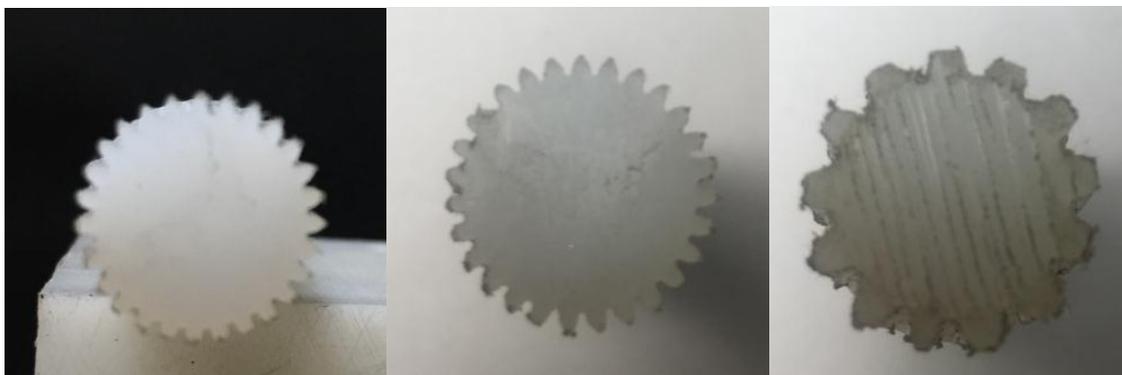


Figura 44. Resultados del maquinado de engranes rectos

Fuente: Propia

4.2.12. Pruebas de engranes helicoidales

Para la fabricación de engranes helicoidales se cuenta con el posicionamiento inclinado de la herramienta en el ángulo de la hélice, siendo este parámetro de diseño para engranes izquierdos o derechos y centrado al eje del engrane como se observa en la Figura 45. Como herramienta de corte se utilizan fresas de disco con módulos 1 y 2 a fin de obtener una mayor referencia de sobre el ángulo entre los dientes de los engranes.

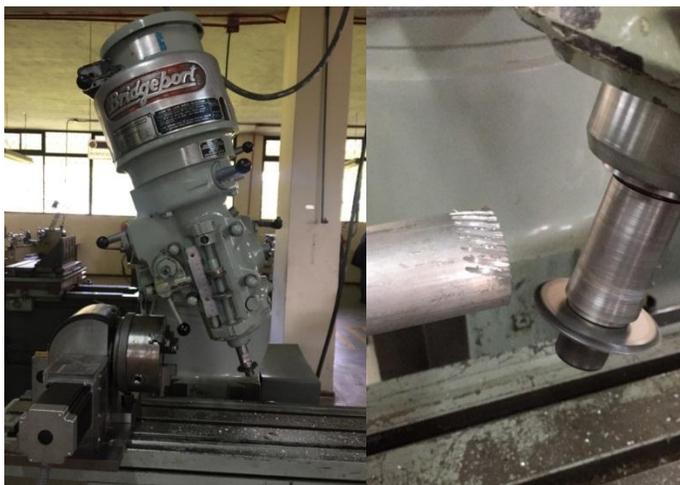


Figura 45. Posicionamiento del cabezal para engrane helicoidal izquierdo y derecho
Fuente: Propia

Las pruebas realizadas son unos engranajes derechos e izquierdos maquinados en aluminio y duralón con los parámetros correspondientes a la Tabla 46.

Tabla 48

Parámetros de diseños para engrane helicoidal

| Módulo | 1 | 2 |
|--------------------------|--------------------|---------|
| Diámetro exterior | 40 mm | 40 mm |
| Módulo | 1-2 | 1-2 |
| Material | Aluminio - Duralón | Duralón |
| Número de dientes | 34 | 27 |
| Ángulo helicoidal | 20 | 30 |
| Avance mm/min | 300 | 300 |
| RPM husillo | 3500 | 3500 |

Fuente: Propia

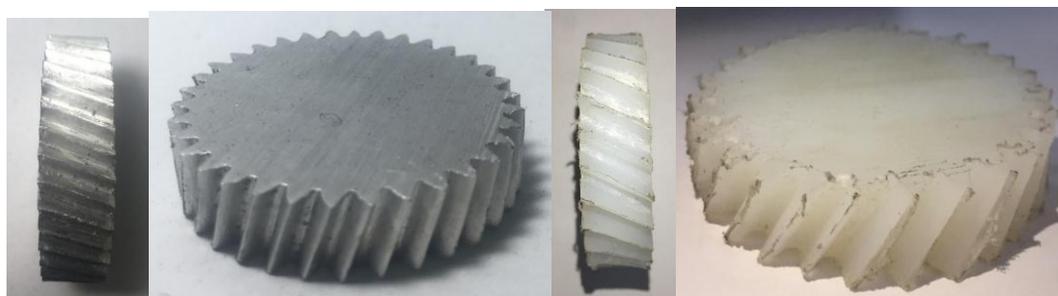


Figura 46. Resultado para engrane helicoidal derecho de módulos 1 y 2
Fuente: Propia

Obteniendo así engranes helicoidales que cumplen simetría en sus características, como se observa en la Figura 46 los engranes derechos y en la Figura 47 los engranes izquierdos. Además se comprobó que pueden transmitir potencia entre los dos engranajes maquinados al lograr engranar de forma correcta.



Figura 47. Resultado para engrane helicoidal izquierdo de módulos 1 y 2
Fuente: Propia

Tabla 49

Resultados para la altura del diente en engranes helicoidales y rectos

| Módulo | Engrane | Material | Altura del diente (mm) | | Error (mm) |
|--------|-----------|----------|------------------------|-----------|------------|
| | | | Promedio | Calculado | |
| 1 | Derecho | Aluminio | 2.21 | 2.25 | 0.02 |
| | Izquierdo | Duralón | 2.23 | 2.25 | 0.01 |
| 2 | Derecho | Duralón | 4.45 | 4.5 | 0.01 |
| | Izquierdo | Duralón | 4.46 | 4.5 | 0.01 |
| 1.5 | Recto | Aluminio | 3.4 | 3.38 | 0.01 |

Fuente: Propia

Las medidas tomadas de la altura del diente en los engranajes de módulos 1, 1.5 y 2, se comparan con el valor calculado en la Tabla 49, como resultado se obtiene un error máximo de 1.78% y un mínimo del 0.22%. También se miden los valores correspondientes al paso circular de dichos engranes como se observa en la Tabla 50, generando un error máximo de 1.38% y un mínimo 0.83%. Además, se comprobó la transmisión de movimiento entre los engranes izquierdos y derechos.

Tabla 50

Resultados para el paso circular en engranes helicoidales y rectos

| Módulo | Engrane | Material | Paso circular (mm) | | Error (mm) |
|--------|-----------|----------|--------------------|-----------|------------|
| | | | Promedio | Calculado | |
| 1 | Derecho | Aluminio | 3,3 | 3,34 | 0,01 |
| | Izquierdo | Duralón | 3,3 | 3,34 | 0,01 |
| 2 | Derecho | Duralón | 7,16 | 7,26 | 0,01 |
| | Izquierdo | Duralón | 7,2 | 7,26 | 0,01 |
| 1.5 | Recto | Aluminio | 4,71 | 4,76 | 0,01 |

Fuente: Propia

4.2.13. Pruebas de post procesado en SolidWorks

Para las siguientes pruebas se dibuja una pieza correspondiente a un eje torcido como se muestra en la Figura 48, que puede ser únicamente mecanizado con un centro de mecanizado de 3 ejes y un cuarto eje indexado.

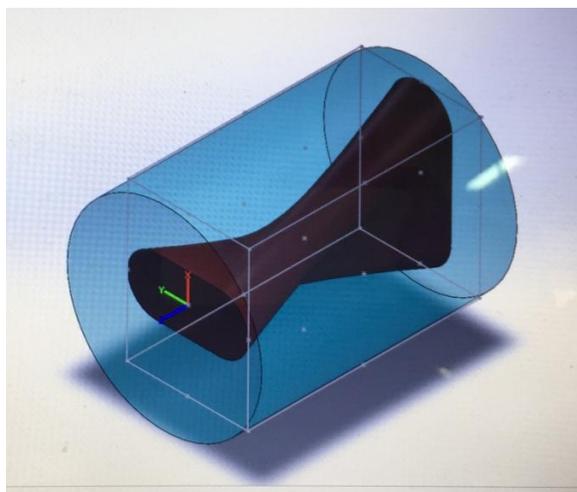


Figura 48. Diseño 3D en Solidworks de pieza a mecanizar

Fuente: Propia

Dentro de las operaciones realizadas están un desbaste con una herramienta de fresada plana de 8 mm, obteniendo como resultado un desbaste de profundidad de 1mm entre capas, como se observa en la Figura 49.



Figura 49. Resultado del maquinado de la pieza dibujada
Fuente:Propia

Como resultado final del mecanizado con código G generado por el software SolidWorks, se cambia la herramienta por una fresa de bola para obtener un mejor acabado superficial, como se observa en la Figura 50.



Figura 50. Resultado del maquinado de la pieza dibujada con mejor acabado
Fuente:Propia

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. Conclusiones

- Se diseñó e implementó el sistema de cuarto eje para la fresadora CNC Bridgeport, conformado por un cabezal divisor de relación 40:1 con un torque inercial de entrada 2,5 Nm, para lo cual se utilizó un motor a pasos Nema 34. Obteniendo un torque de salida máximo de 340Nm en el cuarto eje. Controlado por un Teach Pendant de manera automática y manual.
- Se diseñó y construyó un Teach Pendant para la fresadora Bridgeport, la cual se divide en controlador, periféricas y comunicación. Siendo el controlador programado en Python usando el complemento PyCNC. Cuenta con periféricas de un teclado diseñado para comandos CNC, un paro de emergencia que deshabilita el husillo y los cuatro ejes, tiene una activación de seguridad por medio de una llave que habilita el uso del Teach Pendant, una entrada USB para cargar el código G y una pantalla táctil de 7 pulgadas. Tiene una comunicación RJ45 con un sistema de seguridad redundante.
- Se desarrolló un sistema de seguridad redundante que con fines de carrera para las posiciones máximas y mínimas permitidas por la fresadora Bridgeport. El sistema permite la deshabilitación del husillo y de los 4 ejes cuando es activada la alerta. Cuenta con una alerta sonora, además de un botón de seguridad que permite salir de dicho estado.
- Se implementó una interfaz humano máquina (HMI) para el control manual, el cual permite insertar el cero de pieza, programar el avance de los ejes, la velocidad del

husillo, selección de pasos de avance en milímetros de 0.01, 0.1, 1, 10, 100 para los ejes XYZ y un avance angular para el cuarto eje E. Cuenta con botones de desplazamiento positivo y negativo para los 4 ejes. Posee indicadores numéricos para la posición XYZE, velocidad del husillo y avance de los ejes.

- Se diseñó una HMI para el control automático de la fresadora Bridgeport, que cuenta con un interpretador de código G de base, en la cual se permite cargar y ejecutar código G. Además, de poder tomar el cero de pieza, cuenta con un terminal de programación línea por línea de código G en el cual se puede ingresar coordenadas por teclado. Tiene un sistema de seguridad de límites máximos virtuales, manejo de registros de posiciones, velocidad del husillo y avance de los ejes. Posee indicadores numéricos para la posición XYZE, velocidad del husillo y avance de los ejes.
- Se obtuvo como resultado de las pruebas una tolerancia en los ejes XYZ de ± 0.1 mm, manteniéndose así en la tolerancia propuesta en el anterior controlador diseñado para la fresadora Bridgeport y una tolerancia de ± 0.5 grados entrando así en la tolerancia propuesta de $\pm 0,8$ grados para el cuarto eje.
- Se realizaron pruebas de mecanizado en material de aluminio y duralón, con el fin de obtener engranes rectos, helicoidales izquierdos y derechos. En los cuales se encontró una tolerancia de ± 0.02 mm en la altura del diente y ± 0.01 mm en el paso circular, sobre los parámetros de referencia en el diseño de cada engrane.

5.2. Recomendaciones

- A fin de mejorar la precisión obtenida en el diseño del cuarto eje se recomienda reemplazar el cabezal divisor por un acople directo, de esta forma se evita la pérdida de pasos y se mejora la tolerancia obtenida.
- Al realizar piezas de alta complejidad, el uso prolongado de los motores puede provocar sobrecalentamiento de los mismos, provocando pérdida de pasos en los motores por lo que se recomienda realizar pausas durante el mecanizado.
- Para obtener mejores resultados en el mecanizado de engranes rectos, helicoidales y prolongar la vida útil de la herramienta, se recomienda no sobrepasar profundidades de corte mayores a 1 mm, a partir del módulo 2 en fresas de disco.

5.3. Trabajos futuros

Se propone implementar el cambio de herramientas automático junto con las compensaciones de herramienta necesarias para el controlador de la fresadora.

Implementar un sistema automatizado que permita ubicar el cero de pieza para cuatro ejes, con el propósito de mejorar la tolerancia de las piezas maquinadas.

Implementar una cámara refrigerante para los motores de los cuatro ejes, a fin de obtener mayor tiempo de trabajo en el mecanizado.

Bibliografía

- AMCI, A. m. (2016). *Stepper vs Servo*. Obtenido de <https://www.amci.com/industrial-automation-resources/plc-automation-tutorials/stepper-vs-servo/>
- AUTODESK. (11 de Octubre de 2018). *HSMWORKS*. Obtenido de <https://www.autodesk.com/products/hsm/overview>
- Braga, N. C. (2003). *Mechatronics Sourcebook*. Thomson.
- Budynas, R., & Nisbett, J. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México D.F.: McGraw-Hill.
- Carrasco García, J. C. (2006). Tecnología avanzada del diseño y manufactura asistidos por computador - CAD/CAM. 4(1), 75-81.
- García, J. C. (2008). *Caracterización y generación de dientes de engranjes*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- González Ricadeneira, L. B., & Changoluisa Santacruz, C. J. (2016). *Diseño e implementación de un sistema CNC para la automatización de una fresadora Bridgeport perteneciente al laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE*. Quito: Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- Industry, D. (30 de Enero de 2015). *Máquina transfer rotativa*. Obtenido de <http://www.directindustry.es/prod/starrag/product-122219-1368399.html>
- Ingemecánica. (2014). *Fundamentos de las Transmisiones por Engranajes*. Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn150.html>

- Inverse Solutions, I. (29 de Agosto de 2018). *3, 4, 5 AXIS MACHINING. WHAT IS THE DIFFERENCE?* Obtenido de <https://inversesolutionsinc.com/345-axis-machining-what-is-the-difference/>
- Karaguzel, U., Bakkal, M., & Approach, A. (2012). Process Modeling of Turn-Milling Using Analytical Approach . *ELSEVIER*, 131-139.
- Khabarov, N. (23 de Febrero de 2018). *PyCNC*. Obtenido de Controlador de máquina CNC Python para Raspberry Pi y otras placas ARM Linux: <https://github.com/Nikolay-Kha/PyCNC>
- Martinez, E. (2016). *Implementación de operaciones tecnológicas, para la generación de engranes rectos, en centro de maquinado multieje CNC*. Bogotá D. C.: Universidad Santo Tomás.
- Montalvo, W. (2016). *Diseño de un sistema de cuarto eje para el centro de mecanizado del Laboratorio CAMPRO de la FIMCP-ESPOL*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Nieto, C., López, R., & Galvis, O. (28 de Marzo de 2018). *Metalmecánica: Montaje y alineación de acoplamientos*. Obtenido de <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general>
- OCW. (2015). *Transmision de movimiento*. Obtenido de https://ocw.unican.es/pluginfile.php/228/course/section/139/tema_5%201.pdf
- P. Groover, M. (2001). *Automation in Production Systems*. Prentice-Hall International Editions.
- Pareja, M. (2010). *Diseño y desarrollo de circuitos impresos con KICAD*. Madrid: RC libros.
- Plata, U. N. (9 de Julio de 2015). *Sistemas de Control Numérico Computarizado*. Obtenido de <http://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/E0284>
- RaspberryPi. (2018). *Raspberry Pi 2*. Obtenido de <https://www.raspberrypi.org/>

Riba, C. (2002). *Diseño concurrente*. Barcelona: Politext.

Rojas, A. R.-F. (16 de Julio de 2009). *Despliegue de la función calidad (QFD)*. Madrid. Obtenido de asesordecalidad.

SANDVIK. (2012). *Catálogo de materiales*. Obtenido de https://www.sandvik.coromant.com/es/events_training/Documents/Traning_Brochure_2018_A4_SPA_v02_LowRes.pdf

SOLIDCAM. (30 de Abril de 2015). *SolidCAM with revolutionary iMachining*. Obtenido de <https://www.solidcam.com/es/company/about-solidcam/>

Technologies, B. M. (8 de Diciembre de 2016). *Why are 4 Axis CNC Machines Preferred over Other Types?* Obtenido de <http://www.bdeinc.com/blogs/4-axis-cnc-machines-preferred-types/>

TECNO-WIDIA. (30 de 07 de 2018). *Herramientas e insumos para la industria*. Obtenido de Fresa de módulo para tallas engranajes cilíndricos de perfil constante ángulo de engrane: http://www.tecno-widia.com.ar/milling_tools%2010.html

Valera, M. (2012). *Modelado y análisis de un sistema de sujeción*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.