

**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL
ECUADOR**

FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**DISEÑO DE UN ROUTER CNC CON CAMBIO AUTOMÁTICO DE
HASTA TRES HERRAMIENTAS**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECATRÓNICA.**

IVÁN DAVID RACINES JIMÉNEZ

DIRECTOR: ING. JOSÉ GUSTAVO BELTRÁN BENALCÁZAR

D. M. Quito

2020

DECLARACIÓN

Yo, IVÁN DAVID RACINES JIMÉNEZ, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he investigado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo a la Universidad Internacional del Ecuador, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

IVÁN DAVID RACINES JIMÉNEZ

C.I. 172216050-2

CERTIFICACIÓN

El docente de la Escuela de Ingeniería Mecatrónica, Ingeniero José Gustavo Beltrán Benalcázar.

CERTIFICA QUE:

El proyecto de investigación “Diseño de un router CNC con cambio automático de hasta tres herramientas”, fue desarrollado por: Iván David Racines Jiménez y ha sido debidamente revisado y está en condiciones de ser entregado para que siga lo dispuesto por la Escuela, correspondiente a las sustentación y defensa del mismo.

ING. JOSÉ BELTRÁN

DIRECTOR DE PROYECTO

ÍNDICE GENERAL

ROUTER CNC	1
1. TEMA.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	1
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
4. HIPÓTESIS.....	2
5. ESTADO DEL ARTE	2
6. GENERALIDADES	6
6.1 SISTEMA CNC	7
6.2 CÓDIGO G	9
6.3 HERRAMIENTAS PARA MDF.....	9
7. DISEÑO, SELECCIÓN DE EQUIPOS Y SISTEMAS.....	12
7.1 DISEÑO MECÁNICO.....	12
7.1.1 Diseño del eje Z.....	13
7.1.1.1 Motor Herramienta	13
7.1.1.2 Rodamientos Lineales.....	20
7.1.1.2.1 Carga Estática	20
7.1.1.2.2 Carga Dinámica	24

7.1.1.3	Tornillo de Potencia.....	25
7.1.1.3.1	Torque del tornillo de potencia.....	27
7.1.1.3.2	Esfuerzos del tornillo de potencia	28
7.1.2	Diseño del eje X	29
7.1.2.1	Rodamientos Lineales.....	30
7.1.2.1.1	Carga Estática	30
7.1.2.1.2	Carga Dinámica	31
7.1.2.2	Tornillo de Potencia.....	32
7.1.2.2.1	Torque Tornillo de Potencia.....	34
7.1.2.2.2	Esfuerzos del tornillo de potencia	35
7.1.2.3	Cálculo de la estructura del pórtico del eje X	36
7.1.2.3.1	Diagramas de fuerza cortante y momento flector	39
7.1.2.3.1.1	Diagrama de fuerza cortante	40
7.1.2.3.1.2	Diagrama de momento flector	41
7.1.3	Diseño del eje Y.....	41
7.1.3.1	Rodamientos Lineales.....	42
7.1.3.1.1	Carga Estática	42
7.1.3.1.2	Carga Dinámica	43
7.1.3.2	Tornillo de Potencia.....	44
7.1.3.2.1	Torque Tornillo de Potencia.....	44

7.1.3.2.2	Esfuerzos del tornillo de potencia	45
7.1.3.3	Cálculo de la estructura del eje Y	46
7.1.3.3.1	Diagramas de fuerza cortante y momento flector	48
7.1.3.3.1.1	Diagrama de fuerza cortante	48
7.1.3.3.1.2	Diagrama de momento flector	49
7.1.4	Diseño Final.....	50
7.2	DISEÑO ELECTRÓNICO.....	50
7.2.1	Selección de Motores Paso a Paso	50
7.2.2	Selección de Drivers para los Motores Paso a Paso	51
7.2.3	Selección de la Fuente de Alimentación	53
7.2.4	Selección del Controlador.....	54
7.2.5	Selección de Sensor de Posicionamiento.....	56
7.3	LÓGICA DE FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA	56
7.3.1	Diagrama de flujo.....	56
7.3.2	Selección de la Interfaz Máquina – Usuario (HMI).....	58
7.3.2.1	Protocolo de Puesta en Marcha o de Calibración	58
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Máquina CNC.....	3
Figura 2. RUXTOR RX-FR1325-4	3
Figura 3. Volks CNC 3020 GT	4
Figura 4. ATC 1325C.....	4
Figura 5. Cono morse.....	4
Figura 6. Torrete cambio de herramienta	5
Figura 7. Mecanismo del eje Z	5
Figura 8. Mecanismo de intercambio de herramienta.....	5
Figura 9. Máquina con cambio de herramienta automático.....	6
Figura 10. Colector de polvo para máquinas ruteadores CNC	6
Figura 11. Datacut Raptor CNC	9
Figura 12. Fresas para MDF	10
Figura 13. Fresa recta	10
Figura 14. Fresa biselada.....	11
Figura 15. Fresa redondeadora	11
Figura 16. Sistema para el cambio de herramienta automático	11
Figura 17. Esquema general del router CNC	12
Figura 18. Diseño del eje Z	13
Figura 19. Especificaciones de la fresa	14

Figura 20. Factor de layout de recirculaciones	22
Figura 21. Estructura del eje X	30
Figura 22. Fuerza específica de corte catálogo DORMER	33
Figura 23. Deflexión de viga con apoyos simples y carga central.	37
Figura 24. Simulación de desplazamiento de la estructura del eje X	39
Figura 25. Diagrama de cuerpo libre de estructura eje X	40
Figura 26. Diagrama de fuerza cortante	40
Figura 27. Diagrama de momento flector	41
Figura 28. Estructura del eje Y	42
Figura 29. Simulación del desplazamiento de la estructura del eje Y	47
Figura 30. Diagrama de cuerpo libre de la estructura del eje X.....	48
Figura 31. Diagrama de fuerza cortante.....	49
Figura 32. Diagrama de momento flector	49
Figura 33. Esquema del router CNC	50
Figura 34. Driver EM556S marca Leadshine.....	53
Figura 35. Fuente de poder RPS4810 marca Leadshine	54
Figura 36. Controlador MP3700	55
Figura 37. Sensor inductivo.....	56
Figura 38. Diagrama de flujo del router CNC	57
Figura 39. HMI Mach 3	58

Figura 40. Configuración de pines de salida	59
Figura 41. Configuración de señales de entrada	60
Figura 42. Puesta a punto del motor del eje X	60
Figura 43. Configuración por software de límites y referencias.....	61
Figura 44. Configuración ejes esclavos.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Máquinas CNC industriales.	3
Tabla 2. Tipos de cambio de herramienta automático.....	4
Tabla 3. Patentes relacionadas con router CNC	5
Tabla 4. Requerimientos de diseño	7
Tabla 5. Tipos de fresas	10
Tabla 6. Velocidades de corte recomendadas	14
Tabla 7. Avance por diente de herramientas más comunes.....	15
Tabla 8. Especificaciones portaherramientas ISO30-ER32.....	17
Tabla 9. Aceleración angular del husillo	19
Tabla 10. Especificaciones motor herramienta.....	20
Tabla 11. Factor de contacto.....	21
Tabla 12. Peso de componentes del eje Z	22
Tabla 13. Coeficiente de seguridad estático.....	23
Tabla 14 .Características técnicas del tornillo de potencia.....	25
Tabla 15. Carga del tornillo de potencia	27
Tabla 16. Peso de componentes del eje X	30
Tabla 17. Deflexión máxima de una viga.....	36
Tabla 18. Error porcentual de la deflexión de estructura del eje X	39
Tabla 19. Peso de componentes del eje Y	42

Tabla 20. Error porcentual de la estructura del eje Y	47
Tabla 21. Resumen de torques requeridos	51
Tabla 22. Especificaciones generales del motor paso a paso 57HSB21A	51
Tabla 23. Especificaciones generales del driver	52
Tabla 24. Especificaciones generales de la fuente de alimentación	53

ROUTER CNC

1. TEMA

Diseño de un router CNC con cambio automático de hasta tres herramientas.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar un router CNC con cambio automático de hasta tres herramientas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar y documentar el funcionamiento de máquinas CNC de 4 ejes.
- Caracterizar los tipos de herramientas utilizados en la industria de muebles, principalmente para trabajos en MDF.
- Diseñar una estructura base para un área de trabajo de 2440 x 1220 mm² y un espesor máximo de 18 mm.
- Diseñar un mecanismo que permita el desplazamiento a lo largo de los 4 ejes.
- Seleccionar un sistema electrónico adecuado para el control de la máquina.
- Seleccionar una interfaz HMI para el monitoreo de la máquina y las condiciones de mecanizado.
- Seleccionar un software CAD/CAM adecuado para el funcionamiento de la máquina.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria de muebles de baño y de cocina requiere el corte de piezas de MDF con dimensiones establecidas según el mueble a ensamblar, IMAC es una empresa dedicada a la fabricación de muebles de baño y de cocina modulares y muebles fabricados a la medida de los requerimientos del cliente. La fabricación de los muebles es actualmente una operación manual que necesita de 2 trabajadores, en donde se parte de la adquisición de la materia prima (MDF), hasta el tratamiento a dicha materia prima es decir se corta a medida de las piezas solicitadas para su posterior ensamble. La empresa requiere convertir el proceso manual de corte de la materia prima en un

proceso semiautomático en el cual se obtenga mediante la router CNC directamente las diferentes piezas necesarias para el ensamble del mueble.

El tiempo y costo que representa cortar las piezas de manera externa a la empresa puede reducirse, logrando optimizar los recursos y el tiempo de ensamble de los muebles, implementando una máquina de control numérico computarizado que a más de producir piezas de manera más eficiente produce piezas de muebles con diseños diferentes e innovadores.

4. HIPÓTESIS

La router CNC para MDF es capaz de fabricar piezas para muebles de baño a partir de un tablero de MDF de 2440 x 1220 mm y hasta 18 mm de espesor, empleando un sistema automático de intercambio de hasta 3 herramientas, el tiempo de corte de las piezas varía dependiendo del espesor del material, la máquina es capaz de producir hasta 45 piezas (correspondiente a 5 muebles MB-600) en una jornada de trabajo.

5. ESTADO DEL ARTE

El análisis de sistemas mecánicos similares o de máquinas existentes ayudan a desarrollar una posible solución y mayor cantidad de alternativas, para esto se realizó una investigación de patentes relacionadas, maquinas existentes, tesis similares.

La tesis realizada en la Universidad Ricardo Palma, Perú, con el tema DISEÑO PARA LA FABRICACIÓN DE MÁQUINA AUTOMATIZADA PARA OPTIMIZAR LA OPERACIÓN DE CORTES RECTOS EN LA MANUFACTURA DE MUEBLES EN MELAMINA, se observa en la Figura 1, de aquí se obtiene como datos relevantes:

- Implementación de mesa de vacío, con 66 discos de absorción
- Eje roscado de bolas recirculantes 16 mm
- Software Edge CAM
- Volumen de trabajo de la maquina CNC 2440 x 1830 x 300 mm³

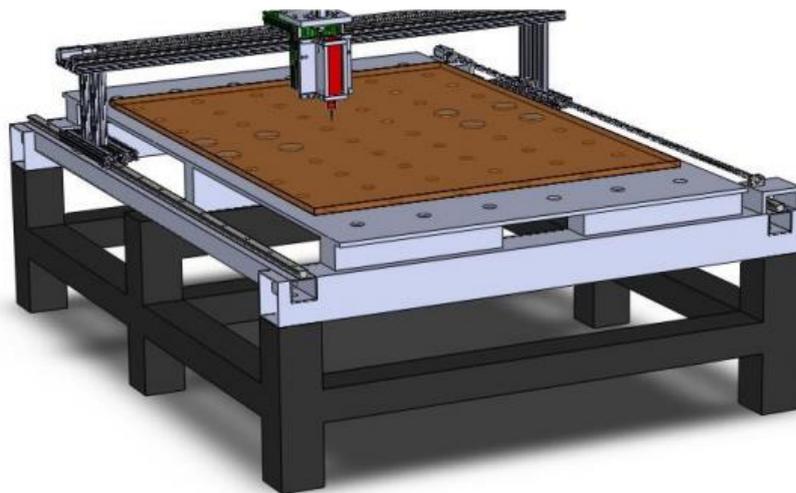


Figura 1. Máquina CNC
Fuente: S. Palma [1]

Se realiza una búsqueda de información de máquinas CNC que se encuentran comercialmente en el mercado, de estas se busca obtener información relevante para utilizar como guía en el diseño de la router CNC.

En la Tabla 1 se observa un resumen de las router CNC investigadas, donde los datos más relevantes son volumen de trabajo, resolución y datos del motor herramienta.

Tabla 1. Máquinas CNC industriales.

MODELO	VOLUMEN DE TRABAJO	RESOLUCIÓN	MOTOR HERRAMIENTA	EQUIPO
Ruxtor / Modelo RX- FR1325- 4	1300 x 2500 x 200 mm ³	+/-0.1 mm	24000 rpm/ 3.2 kW	 <p>Figura 2. RUXTOR RX-FR1325-4 Fuente: www.osnox.com</p>

Volks CNC 3020 GT series	3000 x 2000 x 100 mm ³	eje X y Y 0.03 mm, eje Z 0.001 mm	24 000 rpm / 9 kW	 <p>Figura 3. Volks CNC 3020 GT Fuente: www.volkscnc.com</p>
ATC 1325C CNC Router	1300 x 2500 x 300 mm ³	+-0.03 mm	24 000 rpm / 9 kW	 <p>Figura 4. ATC 1325C Fuente: www.wooddesigner.org</p>

En la investigación realizada sobre tipos de cambio de herramienta que pueden implementarse en la router CNC se encuentran los resumidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Tipos de cambio de herramienta automático

TIPO / DESCRIPCIÓN	EQUIPO
Cono morse, de fácil y rápido acoplamiento	 <p>Figura 5. Cono morse Fuente: www.cnctoolholderstore.com</p>

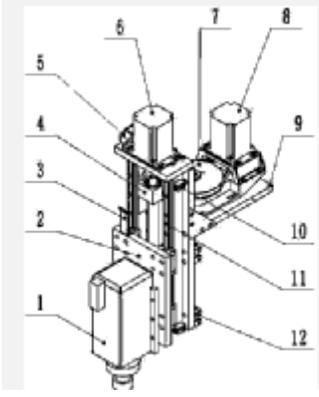
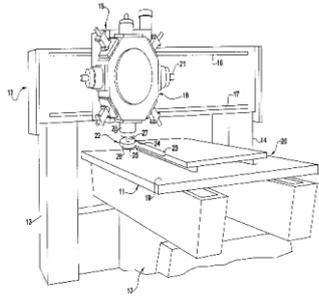
Torreta, cambio rápido de herramienta,
costo elevado.

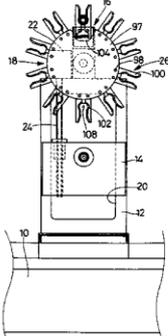
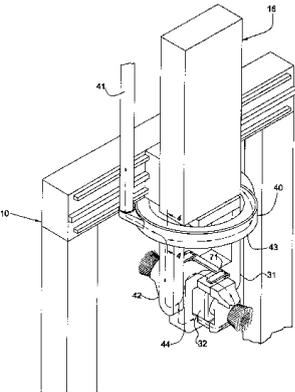


Figura 6. Torreta cambio de herramienta
Fuente: www.izaro.com

En la Tabla 3 se observa algunas de las patentes relacionadas con máquinas CNC y cambios de herramienta, es importante revisar esta información para no proceder a utilizar mecanismos o sistemas que se encuentren aun protegidos:

Tabla 3. Patentes relacionadas con router CNC

PATENTE	MECANISMO / EQUIPO
Mecanismo del eje Z (año 2015)	 <p>Figura 7. Mecanismo del eje Z Fuente: www.patft.uspto.gov</p>
Mecanismo de intercambio de herramienta (año 1998)	 <p>Figura 8. Mecanismo de intercambio de herramienta Fuente: www.patft.uspto.gov</p>

<p>Máquina con cambio de herramienta automático (año 1993)</p>	<p>U.S. Patent Dec. 13, 1994 Sheet 1 of 10 5,372,568</p>  <p>Figura 9. Máquina con cambio de herramienta automático Fuente: www.patft.uspto.gov</p>
<p>Ensamblaje de colector de polvo para máquinas enrutadores CNC</p>	<p>U.S. Patent May 16, 2000 Sheet 2 of 4 6,061,865</p>  <p>Figura 10. Colector de polvo para máquinas enrutadores CNC Fuente: www.patft.uspto.gov</p>

6. GENERALIDADES

Como resultado del análisis de la información recopilada en el estado del arte se puede obtener una tabla de requerimientos de diseño, donde establecemos varios parámetros que serán el punto de partida para nuestro diseño de la router CNC, estos se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4. Requerimientos de diseño

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
Función	Realizar operaciones de fresado en tableros estándar de MDF de hasta 18 mm de espesor Cambiar automáticamente la herramienta, 3 opciones de cambio Monitorear las condiciones de mecanizado de la máquina mediante una HMI
Dimensiones	Dimensiones de la maquina 2800 x 2300 x 1500 mm, estas medidas deben adaptarse para trabajar con tableros estándar (1220 x 2440 mm) y un espesor de 18 mm máximo
Fuerzas	Motor herramienta de 3 a 9 kW y de 24000 RPM
Energía	220 V 60Hz

6.1 SISTEMA CNC

Se considera un sistema de control numérico computarizado a un dispositivo capaz de dirigir y posicionar a un órgano mecánico móvil mediante órdenes elaboradas por computadora o manualmente, a este conjunto de órdenes se le conoce como código de programación o código G. [2]

Actualmente debido al gran desarrollo de las tecnologías de Control Numérico Computarizado (CNC) junto con la integración de Diseño Asistido por Computador (CAD)-Manufactura Asistida por Computador (CAM), se encuentra este tipo de máquinas para el trabajo de manufactura en madera.

Las máquinas de control numérico se categorizan según:

- Número de ejes
- Sistemas de control
- Tipo de actuadores
- Sistema de movimiento

A una máquina CNC se le pueden acoplar diferentes herramientas, entre las más frecuentes son:

- Fresa
- Taladros
- Corte por plasma
- Corte por agua
- Corte y grabado por láser
- Oxicorte

Estas máquinas tienen desde un eje hasta seis ejes de movimiento, cada eje cuenta con un actuador el cual será el responsable del movimiento del mismo.

Se denomina router CNC a las máquinas que se encargan del proceso de manufactura de piezas en 2 o 3 dimensiones mediante el desbaste o corte de material, este corte está guiado por vectores o rutas generadas por un software especializado. [2]

Las router CNC se clasifican por:

- El número de ejes que manejan
- El tipo de material que trabajan

Según el número de ejes que manejan son:

- Dos ejes, únicamente tienen movimiento en el eje “x” y “z” o “y” y “z”
- Tres ejes, que es el sistema básico, movimiento en los 3 ejes “x”, “y” y “z”
- Cuatro ejes, incluye un cabezal o torreta
- Cinco ejes, un cabezal con movimiento hacia arriba y hacia abajo

Una configuración de 3 ejes es muy común en una router CNC, ampliamente usado en la industria de la madera y el metal, como se observa en la Figura 11.



Figura 11. Datacut Raptor CNC
Fuente: www.hexacnc.com

Según el material que trabajan:

- Plástico
- Madera
- Metal

6.2 CÓDIGO G

El código G es el conjunto de órdenes que la máquina CNC receptorá y ejecutará para mecanizar una pieza, es un lenguaje de programación vectorial que permite tanto activar y desactivar los actuadores de la máquina como configurar los parámetros de maquinado como velocidades, avance, herramientas, etc.

El código G está constituido de instrucciones (conocidas como funciones preparatorias las cuales controlan el desplazamiento en los diferentes ejes de la máquina) y misceláneas (instrucciones que están ligadas a la máquina como arrancar, detenerse, cambiar de herramienta, etc.)

6.3 HERRAMIENTAS PARA MDF

La correcta selección de la herramienta para trabajar sobre el MDF (tablero de fibras de densidad media, del inglés medium density fibreboard) es un punto clave, de esto depende la calidad del acabado que la pieza tendrá, la densidad del MDF es más alta que la mayoría de las maderas comunes utilizadas en carpintería, por lo cual, se recomienda la utilización de herramientas de alta calidad provistas con cortantes de widia, la utilización de herramientas con filos de diamante combina una muy buena calidad de terminación con una vida prolongada de las mismas, debido a la gran variedad de bordes que se puede obtener al fresar el MDF la elección de la herramienta adecuada para cada borde es importante, en la Figura 12 se observan algunos tipos de fresas.

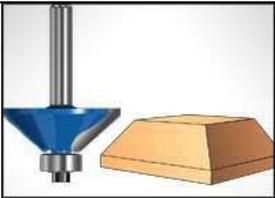


Figura 12. Fresas para MDF
Fuente: www.micarpinteria.wordpress.com

Para el cambio de herramienta automático se utiliza 3 fresas diferentes especificadas en la Tabla 5.

Tabla 5. Tipos de fresas

TIPO	DESCRIPCIÓN	EQUIPO
Fresa recta	Utilizado para realizar cortes rectos de tipo ranura o pasantes.	 <p>Figura 13. Fresa recta Fuente: www.micarpinteria.wordpress.com</p>

Fresa biselada o chaflán	Produce un corte en bisel a un ángulo determinado.	 <p data-bbox="940 461 1453 517">Figura 14. Fresa biselada Fuente: www.micarpinteria.wordpress.com</p>
Fresa redondeadora	Se utiliza para dar un acabado redondo en el borde del material para crear un acabado decorativo.	 <p data-bbox="940 842 1453 898">Figura 15. Fresa redondeadora Fuente: www.micarpinteria.wordpress.com</p>

6.4 CAMBIO DE HERRAMIENTA AUTOMÁTICO

El cambio de herramienta automático es un sistema que brinda las siguientes ventajas:

- Tiempo reducido de cambio de lote con conjuntos de herramientas
- Tiempo reducido de cambio de herramientas desgastadas
- Rápido arranque de la producción

El objetivo de utilizar una torreta o un carrusel para el cambio de herramienta automático es facilitar el mecanizado, debido a que en cada torreta se monta o sujeta distintos tipos de herramientas, en la Figura 16 se observa un ejemplo de un mecanismo para el cambio de herramienta.



Figura 16. Sistema para el cambio de herramienta automático

7. DISEÑO, SELECCIÓN DE EQUIPOS Y SISTEMAS

En esta sección se detalla mediante cálculos, la selección de los diferentes equipos, sistemas o mecanismos, tanto mecánicos como electrónicos, utilizados en la máquina.

Utilizando los requerimientos que se establecieron en la Tabla 4, partimos con el diseño y selección de los componentes.

7.1 DISEÑO MECÁNICO

Para el diseño mecánico de la router CNC, se divide a la misma en 3 módulos fundamentales, eje X, eje Y y eje Z, cada uno de estos cuenta con un mecanismo de transmisión para el movimiento del respectivo eje, un mecanismo de guía con rodamientos lineales, y demás elementos que serán dimensionados a continuación.

En la Figura 17 se observa el esquema general de la máquina, en cual se aprecia los ejes de funcionamiento y el motor herramienta, en cada uno de los ejes se dimensionan los diferentes mecanismos o sistemas requeridos.

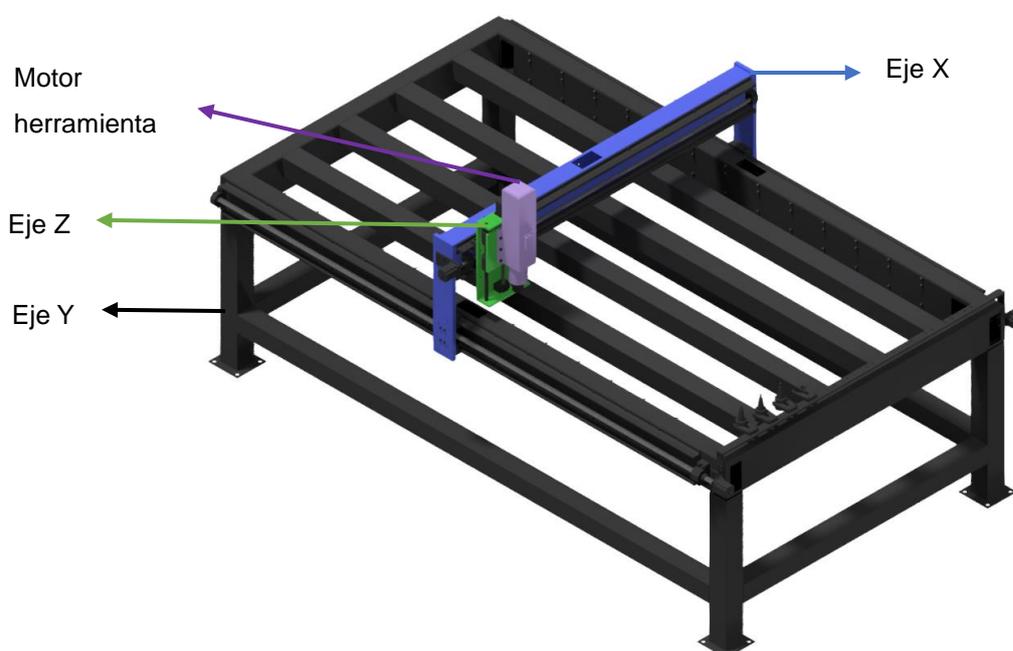


Figura 17. Esquema general del router CNC

7.1.1 Diseño del eje Z

Este eje es el encargado de realizar el movimiento vertical de la motor herramienta, es decir regula la altura de la herramienta de corte utilizada, para esto el mecanismo consta de un tornillo de potencia, guías lineales y un motor a pasos. En la Figura 18 se observa el esquema general del mecanismo del eje Z.

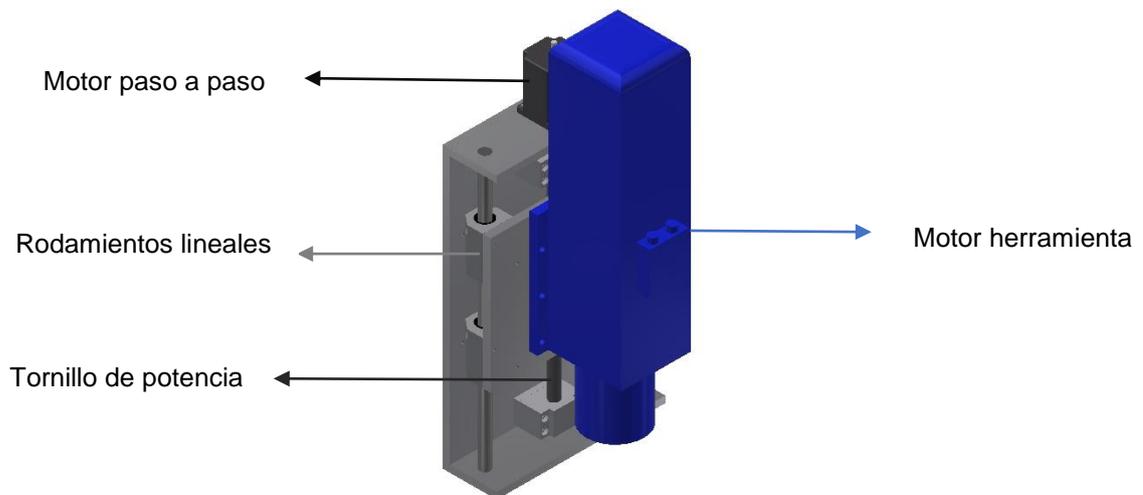


Figura 18. Diseño del eje Z

7.1.1.1 Motor Herramienta

Para la selección del motor que realiza las operaciones de ruteado se calcula:

- Velocidad del husillo [rpm]
- Potencia requerida (kW)

La velocidad del husillo es crucial debido que de esta velocidad depende la calidad del maquinado de las piezas, está dada por (1)

$$n = \frac{vc \cdot 1000}{\pi \cdot dh} \quad (1)$$

Donde:

- n : Velocidad angular del husillo, [rpm]
- vc : Velocidad de corte, [m/min]
- dh : Diámetro de la herramienta, [mm]

La velocidad de corte está establecida para cada material, para este caso se elige los datos para madera de 120 m/min indicados en la Tabla 6, donde se observan las diferentes velocidades de corte que se recomienda para los distintos materiales.

Tabla 6. Velocidades de corte recomendadas [3].

Material	Velocidad de corte, m/min	
	Fresado	
	HSS	Carburo
Acero Suave	20-35	75-130
Aluminio	150-180	335-365
Latón	90-105	180-200
Otros latones & bronce	60-75	150-165
Cobre & bronce fosforado	30-35	60-65
Madera & plásticos	120	180-450
Acero inoxidable sin endurecer	15-30	60-115
Hierro fundido clase 20	130	30

Los datos de espesor y longitud de la herramienta que se utilizan se indican en la Figura 19.

Ref.	D	l	L
102030	3	10	40
102040	4	11	48
102060	6	16	60

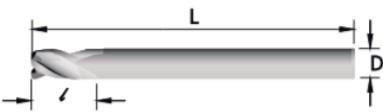


Figura 19. Especificaciones de la fresa
Fuente: www.fresado.com

Reemplazando los datos en (1), se tiene:

$$n = \frac{120 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot 1000}{\pi \cdot 3 \text{ mm}}$$

$$n = 12732,39 \text{ rpm} \approx 12732 \text{ rpm}$$

La velocidad del husillo debe ser un número entero por lo que la velocidad para una herramienta de diámetro 3 mm será de 12732 rpm.

La velocidad de avance (2) que la máquina deberá tener para un correcto ruteado está en función de la velocidad del husillo y de características de la herramienta como el desbaste por diente y el número de dientes.

$$Vf = fz \cdot Zn \cdot n \quad (2)$$

Donde:

- Vf : Velocidad de avance, [mm/min]
- fz : Avance por diente, [mm]
- Zn : Número de dientes, adimensional
- n : Velocidad del husillo, [rpm]

El avance por diente se encuentra tabulado en función del diámetro de la herramienta y del material a trabajar, en la Tabla 7 se observa los diferentes valores.

Tabla 7. Avance por diente de herramientas más comunes [4].

Material	Avance por diente de herramientas comunes (mm)			
	Ø 3mm	Ø 6mm	Ø 10mm	Ø 13mm y >
Madera Dura	0,08-0,13	0,23-0,28	0,41-0,46	0,48-0,54
Madera Blanda	0,10-0,15	0,28-,033	0,43-0,51	0,54-0,59
MDF	0,10-0,18	0,33-0,41	0,51-0,59	0,64-0,69
Compuestos	0,08-0,13	0,23-0,31	0,41-0,46	0,59-0,64
Fenólicos	0,10-0,13	0,28-0,31	0,43-0,46	0,61-0,66
Plásticos ABS	0,05-0,10	0,15-0,23	0,20-0,26	0,26-0,31
Plásticos Suaves	0,08-0,15	0,18-0,26	0,26-0,31	0,31-0,41
Superficies Solidas	0,05-0,10	0,15-0,23	0,20-0,26	0,26-0,31
Acero al Carbono	0,08-0,13	0,20-,026	0,26-0,31	0,31-0,41
Aluminio	0,08-0,13	0,13-0,18	0,15-0,20	0,20-0,26

Utilizando la herramienta de diámetro 3 mm para MDF se toma el valor de avance de 0,1 mm, reemplazando los datos en (2), se tiene:

$$Vf = 0,1 \text{ mm} \cdot 1 \cdot 12732 \text{ rpm}$$

$$Vf = 1273,2 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Para la determinación de la potencia requerida para el motor herramienta se toma en cuenta las características de la herramienta como son diámetro, longitud y densidad del material de la misma.

Para el cálculo de volumen de la herramienta se tiene (3)

$$vh = \frac{\pi \cdot dh^2}{4} \cdot lh \quad (3)$$

Donde:

- vh : Volumen de la herramienta, [m³]
- dh : Diámetro de la herramienta, [mm]
- lh : Longitud de la herramienta, [mm]

Con los parámetros mencionados en la Figura 19, se calcula el volumen de la herramienta (3).

$$vh = \frac{\pi \cdot (3\text{mm})^2}{4} \cdot 40\text{mm}$$

$$vh = 282,74 \text{ mm}^3 = 2,827 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

El cálculo de la masa de la herramienta viene dado por (4).

$$mh = vh \cdot \delta h \quad (4)$$

Donde:

- mh : Masa de la herramienta, [kg]
- vh : Volumen de la herramienta, [m³]

- δh : Densidad de la herramienta, $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

La densidad de la herramienta al ser una fresa de acero de alta velocidad (HSS) es la misma densidad correspondiente al acero, $7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$$mh = 2,827 \cdot 10^{-7} \text{m}^3 \cdot 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$mh = 2,22 \cdot 10^{-3} \text{kg}$$

Una vez determinados estos valores se calcula la inercia de la herramienta Ih que viene dada por (5).

$$Ih = \frac{mh}{8} \cdot dh^2 \quad (5)$$

Donde:

- ih : Inercia de la herramienta, $[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$
- mh : Masa de la herramienta, $[\text{kg}]$
- dh : Diámetro de la herramienta, $[\text{m}^2]$

$$Ih = \frac{2,22 \cdot 10^{-3} \text{kg}}{8} \cdot (0,003 \text{ m})^2$$

$$Ih = 2,49 \cdot 10^{-9} \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

Para el sistema portaherramientas se utiliza un portaherramientas ISO 30- ER32, las especificaciones se indican en la Tabla 8, los datos están obtenidos de su catalogo en el Anexo 1.

Tabla 8. Especificaciones portaherramientas ISO30-ER32

Tipo	Boquilla de sujeción
Taper	ISO30
Diámetro	50 mm
Tipo de boquilla	ER32

Peso	50 kg
------	-------

Fuente: www.pagnonitools.com

$$I_{ph} = \frac{m_{ph}}{8} \cdot d_{ph}^2 \quad (6)$$

Donde:

- i_{ph} : Inercia del portaherramientas, [kg. m²]
- m_{ph} : Masa del portaherramientas, [kg]
- d_{ph} : Diámetro del portaherramienta, [m²]

Tenemos así entonces:

$$I_{ph} = \frac{m_{ph}}{8} \cdot d_{ph}^2$$

$$I_{ph} = \frac{0,5\text{kg}}{8} \cdot (0,05 \text{ m})^2$$

$$I_{ph} = 1,56 \cdot 10^{-4} \text{kg. m}^2$$

El cálculo de la potencia del motor requiere conocer el valor del torque y de la velocidad angular a la que trabaja.

El cálculo del torque se realiza mediante (7).

$$T = I \cdot \alpha \quad (7)$$

Donde:

- T : Torque del motor herramienta, [Nm]
- I : Inercia del elemento, [kg. m²]
- α : Aceleración angular del elemento, [m/s²]

La inercia del elemento es la suma de la inercia de la herramienta y del portaherramientas, que son las partes móviles del motor y viene dada por (8).

$$I = I_h + I_{ph} \quad (8)$$

Donde:

- I : Inercia del elemento, [kg. m²]
- I_h : Inercia de la herramientas, [kg. m²]
- I_{ph} : Inercia del portaherramientas, [kg. m²]

$$I = 2,49 \cdot 10^{-9} \text{kg. m}^2 + 1,56 \cdot 10^{-4} \text{kg. m}^2$$

$$I = 1,56 \cdot 10^{-4} \text{kg. m}^2$$

El factor de conversión de 1 rad/s es 9.549 rpm, en la Tabla 9 se indica la obtención de la aceleración angular, el tiempo que toma el husillo en llegar a la velocidad establecida es 0,1 s.

Tabla 9. Aceleración angular del husillo

Velocidad angular ω (rpm)	Velocidad angular ω (rad/s)	Tiempo t (s)	Aceleración angular α (rad/s ²)
12732	1333,33	0,1	13333,3

Reemplazando los datos en (7), se tiene:

$$T = 1,56 \cdot 10^{-4} \text{kg. m}^2 \cdot 13333,3 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$T = 2,07 \text{ Nm}$$

La potencia del motor viene dada por (9) [5].

$$P = \frac{T \cdot n}{9550} \quad (9)$$

Donde:

- P : Potencia del motor, [kW]
- T : Torque del motor, [N. m]

- n : Velocidad angular del husillo, [rpm]

$$P = \frac{2,07 \text{ Nm} \cdot 12732 \text{ rpm}}{9550}$$

$$P = 2,75 \text{ kW}$$

Para el sistema del motor herramienta se selecciona el motor RATTM MOTOR modelo GDZ120x103-4.5, el cual incorpora un cambio de herramienta automático para conos morse de tipo ISO 30-ER2, sus especificaciones se obtienen de [6] y se resumen en la Tabla 10. Las características del motor se observan en el Anexo 2.

Tabla 10. Especificaciones motor herramienta

MODELO N.º	GDZ120X103-4.5
POTENCIA (kW)	4.5
VELOCIDAD (rpm)	12000-24000
FRECUENCIA (HZ)	400-800
TENSIÓN (V)	220/380
CORRIENTE (A)	15
VASTAGO	ISO30
TIPO DE REFRIGERACIÓN	AIRE
CERTIFICACIÓN	ISO9001 CE SGS, ROHS

El motor seleccionado posee una potencia de 4,5 kW, dato obtenido del datasheet, la potencia calculada requerida es de 2,75 kW, dividiendo la potencia del motor para la requerida obtenemos que el factor de seguridad es de 1,6, por lo que la selección del motor esta correctamente fundamentada.

7.1.1.2 Rodamientos Lineales

Están diseñados para mejorar las prestaciones de guiado lineal reduciendo el coeficiente de fricción y el mantenimiento, el tipo de sistema de guía lineal es con recirculación de bolas, la capacidad de carga de los rodamientos está definida por condiciones de carga estática y dinámica.

7.1.1.2.1 Carga Estática

La capacidad de carga estática (C_0) es el índice que se utiliza para evaluar la capacidad de un sistema de guía lineal para absorber cargas y/o momentos estáticos, los valores de C_0 están determinados en tablas propias de los fabricantes de guías lineales [7].

El coeficiente de seguridad estático (a_s) está dado por (10):

$$a_s = f_c \cdot f_B \cdot \frac{C_0}{W} \quad (10)$$

Donde:

- a_s : Coeficiente de seguridad estático, adimensional
- f_c : Factor de contacto, adimensional
- f_B : Coeficiente de layout recirculaciones, adimensional
- C_0 : Capacidad de carga estática, [N]
- W : Carga máxima aplicada, [N]

El factor de contacto (f_c) depende del número de rodamientos montados en una misma guía, la durabilidad podría estar afectada por una falta de distribución uniforme de las cargas que se aplican en los rodamientos, la Tabla 11 indica los valores del factor de contacto dependiendo del número de rodamientos por guía [7], el número de rodamientos es dos, por tanto, el factor de contacto es 0,81.

Tabla 11. Factor de contacto

Número de rodamientos por cada eje	f_c
1	1,0
2	0,81
3	0,72
4	0,66
5	0,61

El factor de layout de recirculaciones (f_B) es aplicado a sistemas de guías lineales del tipo eje-rodamiento, este factor permite aumentar la capacidad de carga estática (C_0) en función de la posición de la carga F aplicada respecto al número y posición de bolas recirculantes, esto gracias a una mejor distribución de la carga sobre los elementos

rodantes, en la Figura 20 se indica el factor respecto al número de recirculaciones y posición de la carga [7], se selecciona el factor (f_B) de 1.

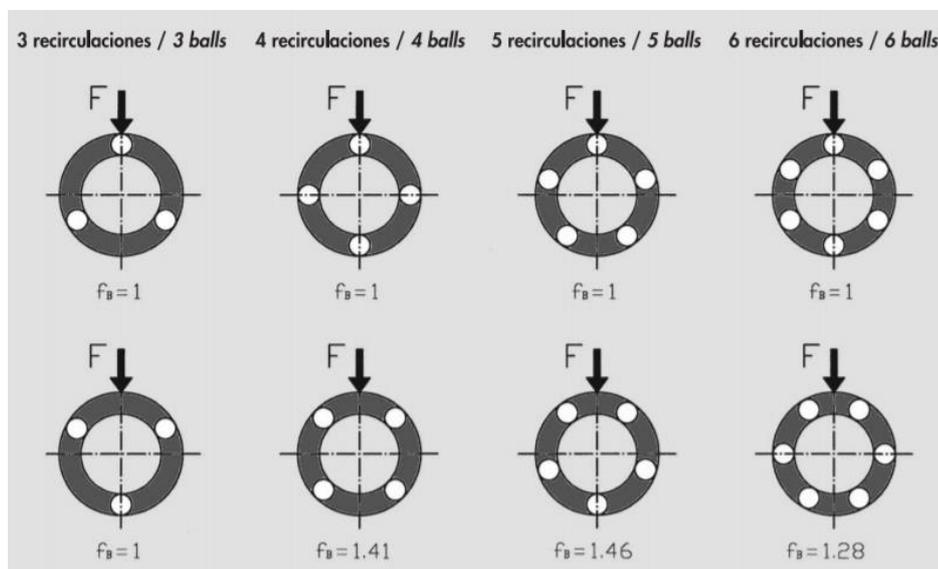


Figura 20. Factor de layout de recirculaciones
Fuente: www.eurobearings.es

La carga aplicada es la suma de los pesos de cada elemento que los rodamientos lineales transportan, para algunos de los elementos se estima el peso proporcionado por el software Autodesk Inventor para tener un valor referencial al real, en la Tabla 12 se detalla el peso de cada uno de los componentes, se considera un estimado de 10 kilos extras por posibles elementos que se deban añadir a la estructura.

Tabla 12. Peso de componentes del eje Z

Elemento	Material	Peso
Motor Herramienta	Varios	26 kg
Base Motor	Aluminio	1 kg
Porta Herramienta	Acero	5 kg
Cableado y Varios	Varios	5 kg
Extras	Varios	10 kg
	Total	47 kg

Por lo que la carga máxima aplicada es (11):

$$W = m \cdot g \quad (11)$$

Donde:

- W : Carga máxima aplicada, [N]
- m : Peso de componentes, [kg]
- g : Gravedad, [$\frac{m}{s^2}$]

$$W = 47 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 460,6 \text{ N}$$

Se selecciona el rodamiento LTBR 16-2LS [8] por la disponibilidad en el mercado y se calcula si cumple con los requerimientos, las características del elemento se presentan en el Anexo 3, el valor de carga estática C_0 indicado en el catálogo es de 1270N, reemplazando los valores en (10), se tiene:

$$a_s = 0,81 \cdot 1 \cdot \frac{1270 \text{ N}}{460,6 \text{ N}} = 2,23$$

Este valor debe ser comparado con los valores mostrados en la Tabla 13, obtenidos del catálogo de rodamientos lineales [7], dependiendo de las condiciones de funcionamiento del rodamiento.

Tabla 13. Coeficiente de seguridad estático

Condiciones de Funcionamiento	a_s mínimo
Estático y pequeñas flexiones	1,0 a 2,0
Dinámico con ligeras flexiones	2,0 a 3,0
Dinámico con impactos, vibraciones y ligeras flexiones	3,0 a 5,0

El coeficiente de seguridad estático debe estar entre 2 y 3, debido a que el funcionamiento es dinámico con ligeras flexiones, con un coeficiente de seguridad de 2,23 el rodamiento cumple con los requerimientos.

7.1.1.2.2 Carga Dinámica

La capacidad de carga dinámica C es un valor utilizado para evaluar cuanta carga dinámica puede absorber el sistema, la misma que determina la vida útil nominal de recorrido o desplazamiento, la vida útil se considera como el recorrido teórico que cumple el rodamiento sin la aparición de fatiga, esta capacidad de carga se ve limitada por:

- Cargas y/o momentos aplicados
- Flexiones del eje
- Velocidad de funcionamiento
- Ciclo de funcionamiento

El cálculo de la vida útil está representado por (12):

$$L = \left(\frac{C}{W}\right)^3 \cdot 50 \quad (12)$$

Donde:

- L : Vida útil nominal, [km]
- C : Capacidad de carga dinámica, [N]
- W : Carga máxima aplicada, [N]

El catálogo del rodamiento seleccionado [8] indica un valor de capacidad de carga dinámica C de 1530 N, reemplazando los datos en (12), se tiene:

$$L = \left(\frac{1530 \text{ N}}{460,6 \text{ N}}\right)^3 \cdot 50 = 1832,62 \text{ km}$$

La vida útil en horas viene dada por (13):

$$L_h = \frac{L \cdot 10^3}{V_m \cdot 60} \quad (13)$$

Donde:

- L_h : Vida útil de servicio, [horas]

- L : Vida útil nominal, [km]
- V_m : Velocidad media equivalente, [m/min]

La velocidad media equivalente representa la velocidad de avance que la maquina tendrá en el eje Z, se establece una velocidad promedio de $1,2 \frac{\text{m}}{\text{min}}$, obtenida en la ecuación (2), reemplazando en (11), se tiene:

$$L_h = \frac{1832,62 \text{ km} \cdot 10^3}{1,2 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot 60} = 25453,05 \text{ horas} \approx 13,25 \text{ años}$$

Se toma en cuenta jornadas laborales de 40 horas semanales durante 12 meses, el resultado de 13,25 años, indica que este elemento no deberá tener un mantenimiento correctivo durante este periodo, lo que representa menor gasto y mayor beneficio para el usuario.

7.1.1.3 Tornillo de Potencia

La función principal del tornillo de potencia es transformar el movimiento giratorio en movimiento rectilíneo, con el fin de transmitir fuerza mecánica. Por motivos de disponibilidad en el mercado se utiliza el tornillo SND/BND 16X5R [9], las principales características dadas por el fabricante se muestran en la Tabla 14, el datasheet se observa en el Anexo 4, este indica que el coeficiente de fricción para el tipo de tornillo seleccionado es de 0,006.

Tabla 14 .Características técnicas del tornillo de potencia

Características Técnicas	
Diámetro del tornillo (d_o)	16 mm
Diámetro de paso (d_m)	13,5 mm
Diámetro de raíz (d_r)	12,7 mm
Paso (p)	5 mm
Coefficiente de fricción (μ)	0,006

Se calcula la eficiencia teórica del tornillo mediante (14):

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\pi \cdot d_o}{p} \cdot \mu} \quad (14)$$

Donde:

- η : Eficiencia teórica, adimensional
- d_o : Diámetro del tornillo, [mm]
- p : Paso, [mm]
- μ : Coeficiente de fricción, adimensional

Reemplazando los datos de la Tabla 14 en (14), se tiene:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\pi \cdot 16 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} \cdot 0,006}$$

$$\eta = 0,94$$

La eficiencia practica considera el valor entre un tornillo nuevo y un tornillo que ha realizado un rodaje adecuado, el fabricante recomienda utilizar en aplicaciones industriales en todas las condiciones de trabajo normales, si las condiciones de trabajo son extremas se debe contactar con el fabricante, la eficiencia practica viene dada por (15):

$$\eta_p = 0,9 \cdot \eta \quad (15)$$

Donde:

- η_p : Eficiencia practica, adimensional
- η : Eficiencia teórica, adimensional

$$\eta_p = 0,9 \cdot 0,94$$

$$\eta_p = 0,846$$

En la Tabla 15 se detallan los pesos de los componentes que el tornillo de potencia debe mover.

Tabla 15. Carga del tornillo de potencia

Elemento	Material	Peso
Motor Herramienta	Varios	26 kg
Base Motor	Aluminio	1 kg
Porta Herramienta	Acero	5 kg
Cableado y Varios	Varios	5 kg
Extras	Varios	10 kg
Rodamientos lineales	Varios	0,88 kg
Tuerca y soporte	Varios	0,5 kg
	Total	48,38 kg

Determinamos la carga máxima aplicada al tornillo de potencia, mediante (11).

$$W = 48,38 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 474,124 \text{ N}$$

7.1.1.3.1 Torque del tornillo de potencia

Para determinar el torque requerido por el tornillo de potencia para mover la carga que se encuentra en la tuerca del tornillo seleccionado, se tiene (16):

$$T_s = \frac{W \cdot p}{2000 \cdot \pi \cdot \eta_p} \quad (16)$$

Donde:

- T_s : Torque, [Nm]
- W : Carga máxima aplicada, [N]
- p : Paso, [mm]
- η_p : Eficiencia practica, adimensional

$$T_s = \frac{474,124 \text{ N} \cdot 5 \text{ mm}}{2000 \cdot \pi \cdot 0,846} = 0,446 \text{ Nm}$$

El torque requerido por el tornillo de potencia para mover el conjunto del eje Z es de 0,446 Nm, debido al acoplamiento directo entre el tornillo y el eje del motor encargado del movimiento este es el torque requerido por el motor paso a paso.

7.1.1.3.2 Esfuerzos del tornillo de potencia

Se determina el esfuerzo cortante nominal, que es el producido por un par de torsión aplicado al tornillo, expresado por (17):

$$\tau = \frac{16 \cdot T_s}{\pi \cdot dr^3} \quad (17)$$

Donde:

- τ : Esfuerzo cortante , [MPa]
- T_s : Torque , [Nm]
- dr : Diametro de raiz, [m]

Utilizando los datos de la Tabla 14 y el torque obtenido del tornillo, se tiene:

$$\tau = \frac{16 \cdot 0,446 \text{ Nm}}{\pi \cdot (0,0127 \text{ m})^3} = 1,108 \text{ MPa}$$

El esfuerzo axial nominal es el producido por una carga que actúa a lo largo del eje longitudinal del tornillo, se determina por (18):

$$\sigma = \frac{4 \cdot W}{\pi \cdot dr^2} \quad (18)$$

Donde:

- σ : Esfuerzo axial , [MPa]
- W : Carga máxima aplicada, [N]
- dr : Diametro de raiz, [m]

Utilizando los datos de la Tabla 14 y la carga máxima aplicada al tornillo, se tiene:

$$\sigma = \frac{4 \cdot 474,124 \text{ N}}{\pi \cdot (0,0127 \text{ m})^2} = 3,742 \text{ MPa}$$

Una vez determinados los esfuerzos se determina el factor de seguridad del tornillo, mediante (19):

$$\frac{1}{N^2} = \left(\frac{\sigma}{S_y}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{S_{ys}}\right)^2 \quad (19)$$

Donde:

- N : Factor de seguridad, adimensional
- σ : Esfuerzo axial , [MPa]
- τ : Esfuerzo cortante , [MPa]
- S_y : Resistencia a la fluencia, [MPa]
- S_{ys} : Resistencia a la fluencia corregida, [MPa]

El valor de la resistencia a la fluencia del material del tornillo, en este caso acero inoxidable es de 276 MPa [12], reemplazamos en (19), y se tiene:

$$\frac{1}{N^2} = \left(\frac{3,742 \text{ MPa}}{276 \text{ MPa}}\right)^2 + \left(\frac{1,108 \text{ MPa}}{0,577 \cdot 276 \text{ MPa}}\right)^2$$

$$N = 65,62$$

El factor de seguridad resultante para el tornillo de potencia del eje Z tiene un valor de 65,62 lo cual es un valor alto, indicando que está sobredimensionado, debido a la alta eficiencia de los tornillos con bolas recirculantes es posible que estos soporten más carga para la que fueron dimensionados, de esta forma se asegura que el tornillo no falla debido a la aplicación de sobrecargas imprevistas.

7.1.2 Diseño del eje X

Este eje es el encargado de realizar el movimiento transversal de la máquina herramienta, para esto el mecanismo consta de un tornillo de potencia, guías lineales y un motor a pasos. En la Figura 21 se observa el esquema general del mecanismo del eje X.



Figura 21. Estructura del eje X

7.1.2.1 Rodamientos Lineales

Al igual que el diseño del eje Z se utiliza el tipo de sistema de guía lineal con recirculación de bolas, la capacidad de carga de los rodamientos está definida por condiciones de carga estática y carga dinámica.

7.1.2.1.1 Carga Estática

La carga aplicada es la suma de los pesos de cada elemento que los rodamientos lineales transportan, para algunos de los elementos se estima el peso proporcionado por el software Autodesk Inventor para tener un valor referencial al real, en la Tabla 16 se detalla el peso de cada uno de los componentes, se añade 10 kilos extras por posibles elementos que se deban incluir a la estructura.

Tabla 16. Peso de componentes del eje X

Elemento	Material	Peso
Eje Z	Varios	49,862 kg
Extras	Varios	10 kg
	Total	59,862 kg

Con este valor se calcula la carga máxima aplicada para el eje x, reemplazando en (11), se tiene:

$$W = 59,862 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 586,64 \text{ N}$$

Se selecciona el rodamiento LTCF 16-2LS por la disponibilidad en el mercado y se calcula si cumple con los requerimientos, las características se indican en el Anexo 5.

Se calcula el coeficiente de seguridad estático (a_s) mediante (10).

El número de rodamientos montados sobre una guía lineal es dos, por lo que el factor de contacto (f_c) toma un valor de 0,81. En la Tabla 11 se indican los valores de factor de contacto.

Debido a la distribución de la carga y el número de recirculaciones, el valor de coeficiente de layout (f_B) es 1, se observa en la Figura 20 los valores para (f_B).

La capacidad de carga estática (C_0) indicada por el fabricante, para el rodamiento seleccionado es de, $C_0 = 1730 \text{ N}$.

Reemplazando en (10), se tiene:

$$a_s = 0,81 \cdot 1 \cdot \frac{1730 \text{ N}}{586,64 \text{ N}} = 2,38$$

Este valor debe ser comparado con los valores mostrados en la Tabla 13 dependiendo de las condiciones de funcionamiento del rodamiento, el coeficiente de seguridad estático debe estar entre 2 y, debido a que el funcionamiento es dinámico con vibraciones y ligeras flexiones que el motor herramienta proporciona al sistema al momento de realizar sus operaciones, con un coeficiente de seguridad de 2,38 el rodamiento cumple con los requerimientos.

7.1.2.1.2 Carga Dinámica

La vida útil se considera como el recorrido teórico que cumple el rodamiento sin la aparición de fatiga, el cálculo de la vida útil está representada por (12):

Para el rodamiento seleccionado LTCF 16-2LS, la capacidad de carga dinámica (C) según el catálogo toma un valor de $C = 2160\text{N}$.

Se reemplaza los valores en (12) y se obtiene:

$$L = \left(\frac{2160 \text{ N}}{586,64 \text{ N}} \right)^3 \cdot 50 \text{ km} = 2495,83 \text{ km}$$

La vida útil en horas viene dada por (13):

$$L_h = \frac{2495,83 \text{ km} \cdot 10^3}{1,2 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot 60} = 27731,44 \text{ horas} \approx 14,44 \text{ años}$$

La vida útil del rodamiento es 14 años, se toma en cuenta para jornadas laborales de 40 horas semanales durante 12 meses, este dato indica que el rodamiento está sobredimensionado y soportara mayores condiciones y cargas de trabajo para las que fue diseñado, esto se debe a que la velocidad media equivalente de $1,2 \frac{\text{m}}{\text{min}}$ podrá incrementar en ciertas ocasiones, así como la jornada laboral también.

7.1.2.2 Tornillo de Potencia

Por motivos de disponibilidad en el mercado se decide utilizar el tornillo SND/BND 16X5R, las principales características dadas por el fabricante son las mostradas en la Tabla 14 [9], los datos de catalogo están en el Anexo 4.

La carga aplicada al tornillo de potencia es la misma carga aplicada en las guías lineales aumentada la fuerza de corte que se requiere para mecanizar el MDF, es decir la fuerza que necesita el mecanismo mientras realiza el corte del MDF, tenemos así (20):

$$F_c = k \cdot fz \cdot pc \quad (20)$$

Donde:

- F_c : Fuerza de corte, [N]
- k : Fuerza específica de corte, [N/mm^2]
- fz : Avance por diente, [mm]
- pc : Profundidad de corte, [mm]

La fuerza específica de corte esta tabulada para diferentes materiales, esta fuerza es definida como la fuerza tangencial de corte necesaria para cortar viruta con una sección de 1 mm^2 [10].

Debido a que no existen tabulados datos específicos del MDF se utiliza como fuerza específica de corte la correspondiente al aluminio, en la Figura 22 se observa los valores correspondientes a la fuerza de corte específica de cada material, cada uno indicado para los diferentes procesos de mecanizado como taladrado, fresado y roscado, se toma el valor para el proceso de fresado, la fuerza específica de corte es $k = 250 \text{ N/mm}^2$.



Información General

FUERZA ESPECÍFICA DE CORTE (VALOR K_C)

		Taladrado	Fresado		Roscado	
		k	k_{C1}	Z	k_C	
Aplicación por grupo de material		Factor de material	N/mm^2	Factor de corrección	N/mm^2	
1. Acero	1.1	Acero blando	1,3	1400	0,18	2000
	1.2	Acero de construcción/cementación	1,4	1450	0,22	2100
	1.3	Acero al carbono	1,9	1500	0,20	2200
	1.4	Acero aleado	1,9	1550	0,20	2400
	1.5	Acero aleado/temple y revenido	2,7	1600	0,20	2500
	1.6	Acero aleado/temple y revenido	3,4	1700	0,20	2600
	1.7	Acero aleado cementado	3,7	1900	0,20	2900
	1.8	Acero aleado cementado	4,0	2300	0,20	2900
2. Acero inoxidable	2.1	Acero inoxidable fácil mecanizado	1,9	1300	0,36	2300
	2.2.	Austenítico	1,9	1500	0,32	2600
	2.3	Ferrítico, Ferr. + Aust., Marten	2,7	1600	0,24	3000
3. Hierro Fundido	3.1	Con grafito laminar	1,0	900	0,26	1600
	3.2	Con grafito laminar	1,5	1100	0,26	1600
	3.3	Con graf. laminar, fundic. maleable	2,0	1150	0,24	1700
	3.4	Con graf. laminar, fundic. maleable	1,5	1450	0,24	2000
4. Titanio	4.1	Titanio no aleado	1,4	900	0,20	2000
	4.2	Titanio aleado	2,0	1200	0,22	2000
	4.3	Titanio aleado	2,7	1450	0,22	2300
5. Nickel	5.1	Níquel no aleado	1,3	1100	0,12	1300
	5.2	Níquel aleado	2,0	1450	0,22	2000
	5.3	Níquel aleado	2,7	1700	0,22	2000
6. Cobre	6.1	Cobre	0,6	450	0,20	800
	6.2	β -Latón, bronce	0,7	500	0,30	1000
	6.3	α -Latón	0,7	600	0,32	1000
	6.4	Metal AMPCO	1,5	1600	0,36	1000
7. Aluminio Magnesio	7.1	Al, Mg, no aleado	0,6	250	0,22	700
	7.2	Al aleado con Si < 0.5%	0,6	450	0,18	700
	7.3	Al aleado con Si > 0.5% < 10%	0,7	450	0,18	800
	7.4	Al aleado, Si>10% Reforzado por filamentos Al-aleados, Mg-aleados	0,7	500	0,15	1000

Figura 22. Fuerza específica de corte catálogo DORMER
Fuente: www.dormerpramet.com

En la Tabla 7 se obtiene el valor de avance por diente para la herramienta, en este caso una fresa de diámetro 3 mm, mostrada en la Figura 19, el valor de avance por diente es $f_z = 0,18$ mm.

La profundidad de corte es la cantidad que la herramienta ingresa en el material, esta distancia no debe ser la totalidad de la herramienta ya que puede generar desgaste en la misma e irregularidades en el mecanizado, para esto se selecciona una profundidad de corte $p_c = 3$ mm.

Reemplazando los datos en (20), se tiene:

$$F_c = 250 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 0.18 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm}$$

$$F_c = 135 \text{ N}$$

La carga neta aplicada al tornillo de potencia viene dada por (21):

$$F = F_c + \mu \cdot W \quad (21)$$

Donde:

- F : Carga neta aplicada, [N]
- F_c : Fuerza de corte, [N]
- μ : Coeficiente de fricción, adimensional
- W : Carga máxima aplicada, [N]

Tomando el dato de la carga máxima aplicada, $W = 586,64$ N, y el coeficiente de rozamiento indicado en la Tabla 14, se reemplaza los valores en (21), y se tiene:

$$F = 135 \text{ N} + (0,006 \cdot 586,64) \text{ N}$$

$$F = 138,51 \text{ N}$$

7.1.2.2.1 Torque Tornillo de Potencia

Se calcula la eficiencia teórica y práctica del tornillo utilizando los datos de la Tabla 14, la eficiencia teórica (14) es:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\pi \cdot 16 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} \cdot 0,006}$$

$$\eta = 0,94$$

La eficiencia practica (15) es:

$$\eta_p = 0,9 \cdot 0,94$$

$$\eta_p = 0,846$$

Para determinar el torque requerido por el tornillo de potencia y mover la carga neta aplicada al tornillo, se utiliza los datos del catálogo proporcionado por el fabricante [9]. Las características del elemento seleccionado se pueden observar en el Anexo 4. Reemplazando en (16):

$$T_s = \frac{138,51 \text{ N} \cdot 5 \text{ mm}}{2000 \cdot \pi \cdot 0,846} = 0,13 \text{ Nm}$$

7.1.2.2.2 Esfuerzos del tornillo de potencia

Se determina el esfuerzo cortante nominal, que es el producido por un par de torsión aplicado al tornillo, expresado por (17), utilizando los datos de la Tabla 14 y el torque obtenido del tornillo, se tiene:

$$\tau = \frac{16 \cdot 0,13 \text{ Nm}}{\pi \cdot (0,0127 \text{ m})^3} = 0,32 \text{ MPa}$$

El esfuerzo axial nominal se calcula con (18), reemplazando los datos de la Tabla 14 y la carga máxima aplicada al tornillo, se tiene:

$$\sigma = \frac{4 \cdot 0,13 \text{ N}}{\pi \cdot (0,0127 \text{ m})^2} = 0,001 \text{ MPa}$$

Una vez determinados los esfuerzos se determina el factor de seguridad del tornillo, mediante (19):

$$\frac{1}{N^2} = \left(\frac{0,001 \text{ MPa}}{276 \text{ MPa}} \right)^2 + \left(\frac{0,32 \text{ MPa}}{0,577 \cdot 276 \text{ MPa}} \right)^2$$

$$N = 497,6$$

El factor de seguridad resultante para el tornillo de potencia del eje X tiene un valor de 497,6 dicho valor es excesivamente alto, esto se debe al sobredimensionamiento que se da por la disponibilidad del fabricante, debido a la longitud del tornillo no existe diámetro menor para el elemento. El elemento no presentará fallas a futuro, aunque se le agreguen cargas extras al mecanismo.

7.1.2.3 Cálculo de la estructura del pórtico del eje X

Para el análisis estructural del pórtico del eje X se realiza el cálculo matemático de la flexión máxima que la estructura tendrá, estos datos serán corroborados con cálculos obtenidos gracias a la simulación en el software de diseño Autodesk Inventor. La longitud de la viga analizada es de 1821 mm, dato obtenido de los planos de diseño.

Según el funcionamiento de la máquina y la precisión que se desee se tiene 3 rangos mostrados en la Tabla 17 [11].

Tabla 17. Deflexión máxima de una viga

Precisión	$Y_{m\acute{a}x}$
Parte general de una máquina	0,0005 a 0,003 $\frac{in}{in}$ o $\frac{mm}{mm}$ de longitud de la viga
Precisión moderada	0,00001 a 0,0005 $\frac{in}{in}$ o $\frac{mm}{mm}$ de longitud de la viga
Alta precisión	0,000001 a 0,00001 $\frac{in}{in}$ o $\frac{mm}{mm}$ de longitud de la viga

Para el cálculo de la estructura del pórtico de la máquina se seleccionan los valores de deflexión máxima establecidos para precisión moderada, representados por (22), se establece precisión moderada ya que la router CNC no fabrica piezas de alta precisión como lo hace un centro de mecanizado CNC, el grado de precisión eleva el costo de la máquina, así como la robustez y la calidad del mecanizado [11].

$$\frac{Y_{m\acute{a}x}}{L} = 0,00001 \text{ a } 0,0005 \quad (22)$$

Donde:

- $Y_{m\acute{a}x}$: Deflexi3n m\acute{a}xima, [mm]
- L : Longitud de la viga, [mm]

Para determinar el valor m\acute{in}imo que se puede deformar la viga se tiene:

$$Y_{m\acute{i}n} = 0,00001 \cdot 1821 \text{ mm} = 0,01821 \text{ mm}$$

Para determinar el valor m\acute{a}ximo que se puede deformar la viga se tiene:

$$Y_{m\acute{a}x} = 0,0005 \cdot 1821 \text{ mm} = 0,9105 \text{ mm}$$

El comportamiento de la viga es con apoyos simples en los extremos y una carga central como se muestra la Figura 23, el c\acute{a}lculo de la deflexi3n m\acute{a}xima para este caso viene dada por (23) [11].

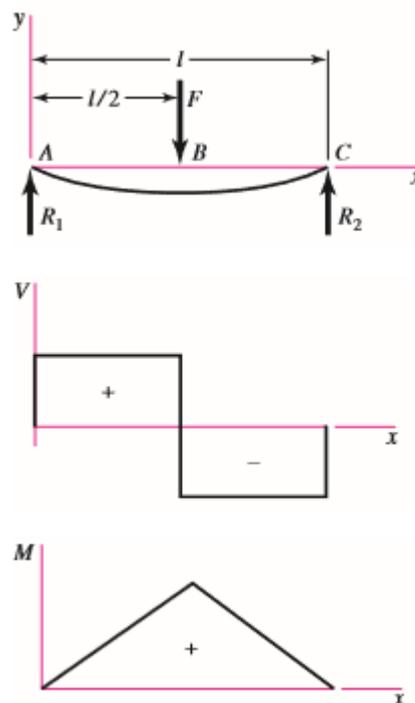


Figura 23. Deflexi3n de viga con apoyos simples y carga central.
Fuente: Dise\~no en Ingenieria Mec\~nica de Shigley

$$Y_{m\acute{a}x} = \frac{W \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (23)$$

Donde:

- $Y_{m\acute{a}x}$: Deflexi3n m\acute{a}xima de la viga, [m]
- W : Carga m\acute{a}xima aplicada sobre la viga, [N]
- l : Longitud de la viga, [m]
- E : M3dulo de elasticidad del material de la viga, [GPa]
- I : Inercia de la viga, [m⁴]

Se selecciona el perfil estructural rectangular de 100 x 200 mm y de espesor 3mm, del cat\acute{a}logo de IPAC, mostrado en el Anexo 6 [13], el valor de inercia para el perfil es de $I = 9,24 \times 10^{-6} \text{m}^4$ y el m3dulo de elasticidad del acero es de $E = 207 \text{ GPa}$

Reemplazando en (23), se tiene:

$$Y_{m\acute{a}x} = \frac{586,64 \text{ N} \cdot (1,821 \text{ m})^3}{48 \cdot 207 \text{ GPa} \cdot (9,24 \cdot 10^{-6}) \text{m}^4} = 3,858 \cdot 10^{-5} \text{m} = 0,038 \text{ mm}$$

Ya que la deflexi3n m\acute{a}xima del tubo estructural seleccionado es de 0,038, este cumple con los l\acute{i}mites de deflexi3n m\acute{a}ximo establecidos para precisi3n moderada, los cuales son 0,01821 mm y 0,9105 mm para la longitud de la viga.

Los valores calculados matem\acute{a}ticamente se los compara con la simulaci3n realizada en el software Autodesk Inventor gracias a sus complementos para an\acute{a}lisis de elementos finitos de la estructura. Se realiza la simulaci3n geom\acute{e}trica de la estructura y se establecen los puntos de apoyos fijos y las cargas correspondientes, para este caso se aplican dos apoyos fijos que est\acute{a}n en los extremos de la viga de soporte principal y la carga m\acute{a}xima que soporta se la ubica en la mitad de la longitud de la viga, establecidos estos par\acute{a}metros se ejecuta la simulaci3n y se obtiene los resultados mostrados en la Figura 24, para una carga aplicada de 586,64 N, el desplazamiento m\acute{a}ximo obtenido es de 0.03801 mm.

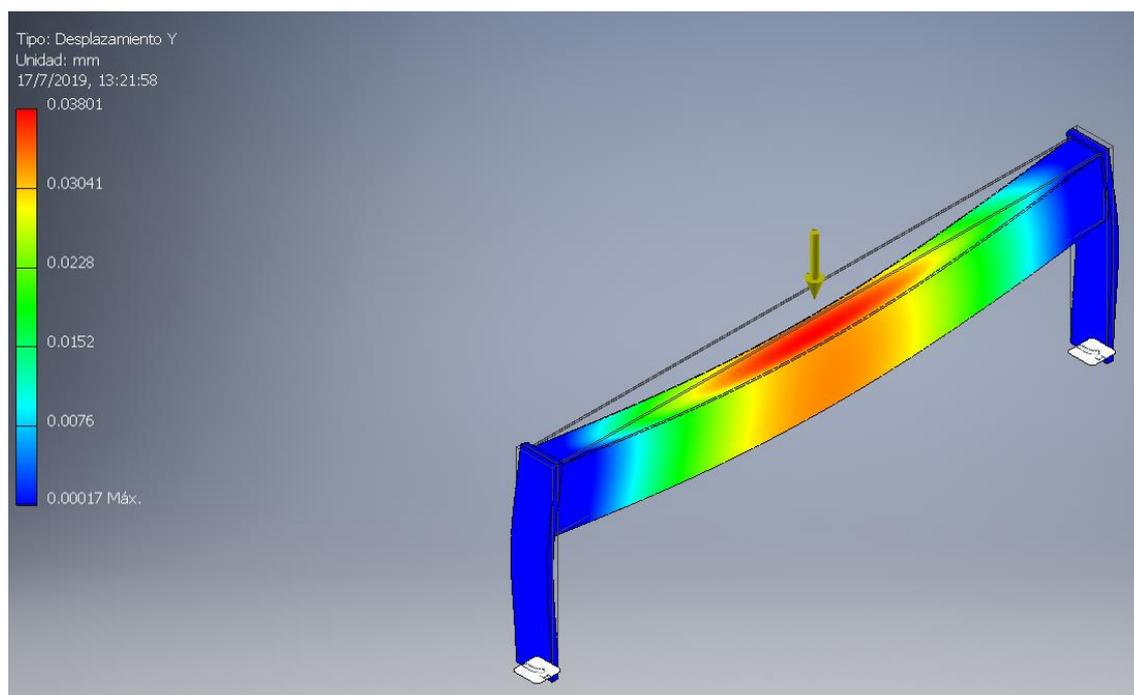


Figura 24. Simulación de desplazamiento de la estructura del eje X

En la Tabla 18 se observa la variación que existe entre los cálculos matemáticos y el valor obtenido de la simulación realizada en Autodesk Inventor.

Tabla 18. Error porcentual de la deflexión de estructura del eje X

Deflexión de la estructura del pórtico		
Cálculo matemático	Valor simulación	%error
0,038 mm	0,03801 mm	0,02 %

El porcentaje de error de 0,02% entre el valor de deflexión calculado y el simulado, corrobora que el diseño matemático de la estructura es correcto, ya que el software genera una simulación completa y precisa de la estructura junto con sus restricciones correspondientes.

7.1.2.3.1 Diagramas de fuerza cortante y momento flector

Los diagramas se utilizan para saber la carga o capacidad máxima que la estructura soporta, estos valores deben estar relacionados con las cargas para las que fue diseñada la estructura, en la Figura 25 se observa el diagrama de cuerpo libre para la

viga principal del eje X o el pórtico, esta tiene dos soportes en los extremos y una carga central que representa la carga del eje Z.

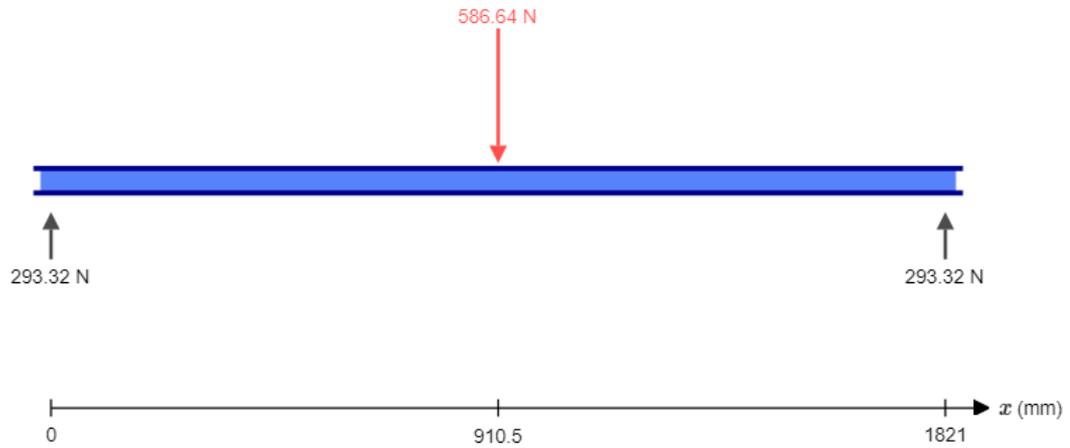


Figura 25. Diagrama de cuerpo libre de estructura eje X

7.1.2.3.1.1 Diagrama de fuerza cortante

El momento cortante máximo que la viga está sometida es de 293,32 N, en la Figura 26 se observa que estos valores se ubican en los apoyos y representan las reacciones en dichos puntos.

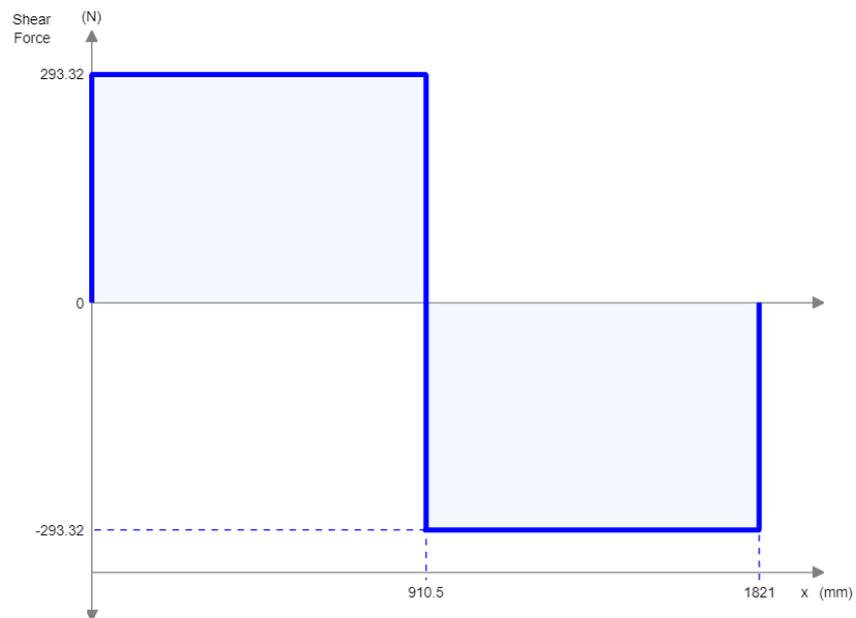


Figura 26. Diagrama de fuerza cortante

7.1.2.3.1.2 Diagrama de momento flector

En la Figura 27 se observa el diagrama de momento flector de la viga, el máximo momento que la viga soportará es de 267067,86 N.mm y está ubicada en la mitad de la longitud de la viga, donde se encuentra la mayor concentración de fuerza.

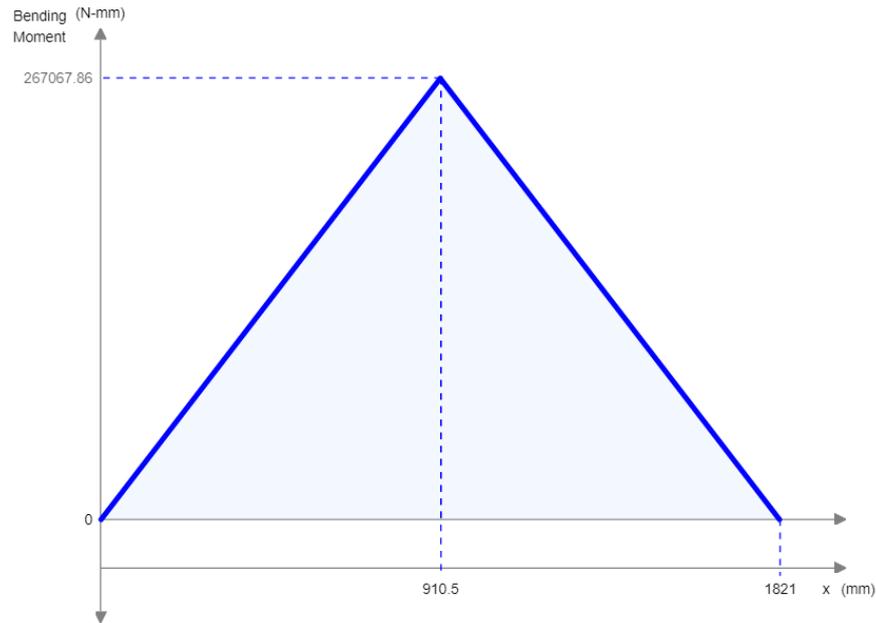


Figura 27. Diagrama de momento flector

7.1.3 Diseño del eje Y

Este eje es el encargado de realizar el movimiento longitudinal de la máquina herramienta, para esto el mecanismo consta de dos tornillos de potencia, guías lineales y dos motores a pasos, estos mecanismos ubicados a cada lado de la máquina. En la Figura 28 se observa el esquema general del mecanismo del eje Y.

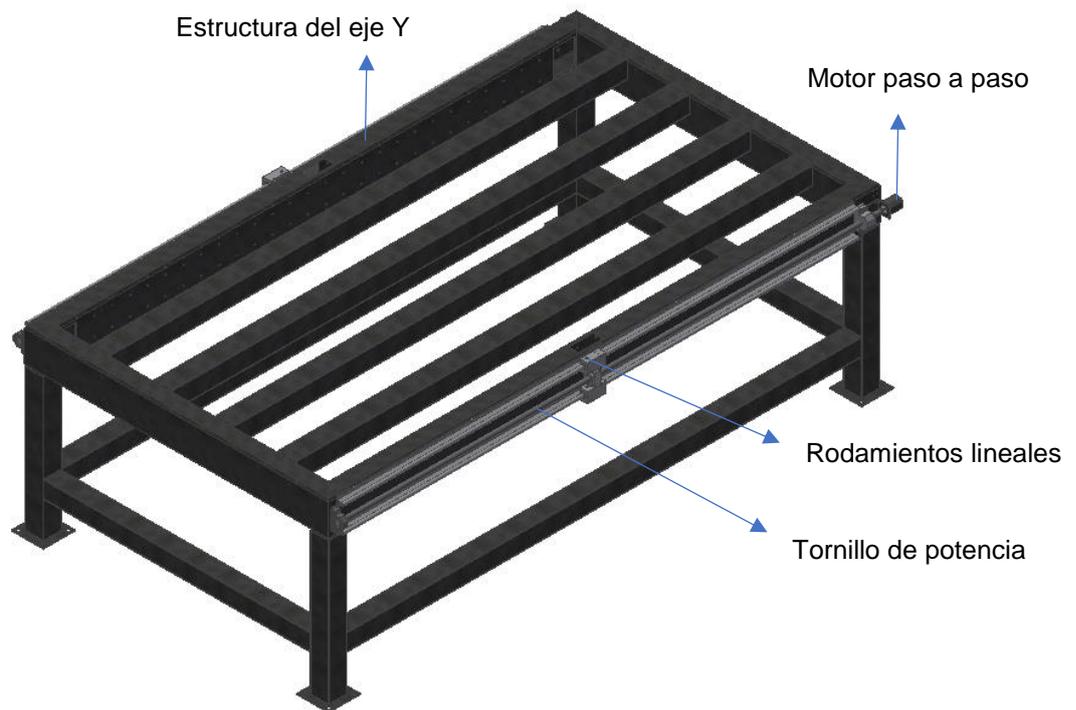


Figura 28. Estructura del eje Y

7.1.3.1 Rodamientos Lineales

Se utiliza el tipo de sistema de guía lineal con recirculación de bolas, la capacidad de carga de los rodamientos está definida por condiciones de carga estática y carga dinámica.

7.1.3.1.1 Carga Estática

Para este análisis se toma en cuenta la carga producida por los componentes del eje Z y del eje X incluidos 10 kg extras de cualquier elemento que pueda ser agregado, el detalle se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19. Peso de componentes del eje Y

Elemento	Material	Peso
Eje X y Z	Varios	112,504 kg
Extras	Varios	10 kg
	Total	122,504 kg

Aplicando (11), se tiene la carga máxima aplicada:

$$W = 122,504 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1200,54 \text{ N}$$

Se selecciona el rodamiento LTCF 25-2LS [8] por la disponibilidad en el mercado y se calcula si cumple con los requerimientos. Las características principales que el catálogo indica se observan en el Anexo 5.

Se calcula el coeficiente de seguridad estático (a_s) mediante (10).

El número de rodamientos montados sobre una guía lineal es dos, por lo que el factor de contacto (f_c) toma un valor de 0,81. Se indican los valores de factor de contacto en la Tabla 11.

Debido a la distribución de la carga y el número de recirculaciones, el valor de coeficiente de layout (f_B) es 1, se observa en la Figura 20 los valores para (f_B).

La capacidad de carga estática (C_0) indicada por el fabricante, para el rodamiento seleccionado es de, $C_0 = 4150 \text{ N}$.

Reemplazando en (10), se tiene:

$$a_s = 0,81 \times 1 \cdot \frac{4150 \text{ N}}{1200,54 \text{ N}} = 2,79$$

Al comparar el valor de 2,79 del coeficiente de seguridad estático obtenido, con los valores de la Tabla 13, se concluye que el rodamiento cumple con los requerimientos ya que se encuentra dentro del rango de funcionamiento dinámico con ligeras flexiones, dicho rango es de 2 a 3.

7.1.3.1.2 Carga Dinámica

Para el rodamiento seleccionado LTCF 25-2LS [8], utilizando la capacidad de carga establecida en el catálogo y la carga máxima aplicada total, reemplazando en (12) se obtiene:

$$L = \left(\frac{4750 \text{ N}}{1200,54 \text{ N}} \right)^3 \cdot 50 \text{ km} = 3096,85 \text{ km}$$

La vida útil en horas es:

$$L_h = \frac{3096,85 \text{ km} \cdot 10^3}{1,2 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot 60} = 43011,80 \text{ horas} \approx 22,4 \text{ años}$$

El rodamiento lineal tendrá una duración de aproximadamente 2 años con una jornada laboral de 40 horas semanales, este largo periodo reduce la cantidad de mantenimientos correctivos de la máquina, hay que tener en cuenta que este periodo puede incrementar dependiendo del huso del router CNC.

7.1.3.2 Tornillo de Potencia

Por motivos de disponibilidad en el mercado se decide utilizar el tornillo SND/BND 16X5R, las principales características dadas por el fabricante son las mostradas en la Tabla 14 [9], los datos del catálogo se encuentran en el Anexo 4.

La fuerza aplicada para este caso es la misma fuerza de corte explicada anteriormente, debido a que el material, el avance y la profundidad de corte no varía.

$$F_c = 75 \text{ N}$$

La fuerza neta aplicada al tornillo de potencia es:

$$F = 75 \text{ N} + (0,006 \times 1200,54) \text{ N}$$

$$F = 540,243 \text{ N}$$

7.1.3.2.1 Torque Tornillo de Potencia

Se calcula la eficiencia teórica y práctica del tornillo utilizando los datos de la Tabla 14, la eficiencia teórica (14) es:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\pi \cdot 16 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} \cdot 0,006}$$

$$\eta = 0,94$$

La eficiencia practica (15) es:

$$\eta_p = 0,9 \cdot 0,94$$

$$\eta_p = 0,846$$

Para determinar el torque requerido por el tornillo de potencia y mover la carga neta aplicada al tornillo, se utiliza los datos del catálogo proporcionado por el fabricante [9]. Las características del elemento seleccionado se pueden observar en el Anexo 4. Reemplazando en (16):

$$T_s = \frac{540,253 \text{ N} \cdot 5 \text{ mm}}{2000 \cdot \pi \cdot 0,846} = 0,51 \text{ Nm}$$

7.1.3.2.2 Esfuerzos del tornillo de potencia

Se determina el esfuerzo cortante nominal, que es el producido por un par de torsión aplicado al tornillo, expresado por (17), utilizando los datos de la Tabla 14 y el torque obtenido del tornillo, se tiene:

$$\tau = \frac{16 \cdot 0,51 \text{ Nm}}{\pi \cdot (0,0127 \text{ m})^3} = 1,268 \text{ MPa}$$

El esfuerzo axial nominal se calcula con (18), reemplazando los datos de la Tabla 14 y la carga máxima aplicada al tornillo, se tiene:

$$\sigma = \frac{4 \cdot 0,51 \text{ N}}{\pi \cdot (0,0127 \text{ m})^2} = 0,004 \text{ MPa}$$

Una vez determinados los esfuerzos se determina el factor de seguridad del tornillo, mediante (19):

$$\frac{1}{N^2} = \left(\frac{0,004 \text{ MPa}}{276 \text{ MPa}} \right)^2 + \left(\frac{1,268 \text{ MPa}}{0,577 \cdot 276 \text{ MPa}} \right)^2$$

$$N = 91,48$$

El factor de seguridad resultante para el tornillo de potencia del eje X tiene un valor de 91,48 dicho valor es excesivamente alto, esto se debe al sobredimensionamiento que se da por la disponibilidad del fabricante, debido a la longitud del tornillo no existe diámetro menor para el elemento. El elemento no presentará fallas a futuro, aunque se le agreguen cargas extras al mecanismo.

7.1.3.3 Cálculo de la estructura del eje Y

Al igual que la estructura de la sección anterior se realiza el cálculo matemático de la flexión máxima que la estructura tendrá, estos resultados serán corroborados con cálculos obtenidos gracias a la simulación en el software de diseño Autodesk Inventor. Según el funcionamiento de la máquina y la precisión que se desee, elegimos la precisión moderada. Para el cálculo de la estructura de la máquina se seleccionan los valores de deflexión máxima establecidos para precisión moderada. La longitud de la viga es de 3103 mm, el valor es obtenido de los planos de diseño.

$$\frac{Y_{m\acute{a}x}}{L} = 0,00001 \text{ a } 0,0005$$

Para determinar el valor mínimo que se puede deformar la viga se tiene:

$$Y_{m\acute{a}x} = 0,00001 \cdot 3103 \text{ mm} = 0,031 \text{ mm}$$

Para determinar el valor máximo que se puede deformar la viga se tiene:

$$Y_{m\acute{a}x} = 0,0005 \cdot 3103 \text{ mm} = 1,551 \text{ mm}$$

Se selecciona un perfil estructural rectangular de 100 x 200 mm y de espesor 4mm, del catálogo de IPAC [13] utilizamos las especificaciones de inercia para los cálculos de la deflexión máxima. El valor de inercia para el perfil es de $I = 1,199 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$ y el módulo de elasticidad del acero es de $E = 207 \text{ GPa}$

Reemplazando en (23), se tiene:

$$Y_{m\acute{a}x} = \frac{1200,54 \text{ N} \cdot (3,103 \text{ m})^3}{48 \cdot 207 \text{ GPa} \cdot (1,199 \cdot 10^{-5}) \text{ m}^4} = 3,01 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,301 \text{ mm}$$

Se puede observar que 0,301 está dentro del rango de deflexión máxima que es de 0,031 mm a 1,551 mm, por lo que la viga cumple con los requerimientos de deflexión máxima establecida para elementos de precisión moderada.

Los valores calculados matemáticamente se los compara con la simulación realizada en el software Autodesk Inventor, se obtiene los resultados mostrados en la Figura 29, para una carga aplicada de 1200,54 N, el desplazamiento máximo obtenido es de 0,2846 mm.

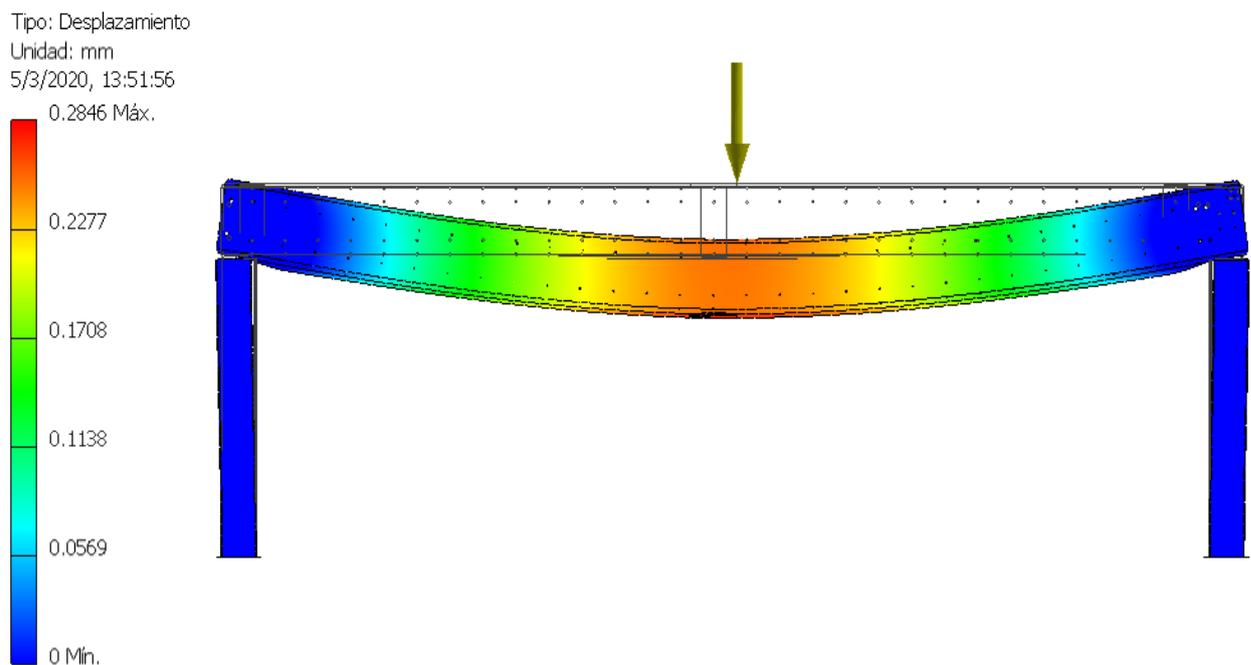


Figura 29. Simulación del desplazamiento de la estructura del eje Y

En la Tabla 20 se observa el error que existe entre los cálculos matemáticos y el valor obtenido de la simulación realizada en Autodesk Inventor.

Tabla 20. Error porcentual de la estructura del eje Y

Deflexión de la estructura del pórtico		
Cálculo matemático	Valor simulación	%error
0,301 mm	0,2846 mm	5,44 %

El error obtenido verifica que los valores calculados matemáticamente cumplen con los requerimientos de deflexión del diseño.

7.1.3.3.1 Diagramas de fuerza cortante y momento flector

En la Figura 30 se muestra el diagrama de cuerpo libre para la estructura de la viga principal del eje Y, esta viga tiene dos soportes en los extremos y una carga central que representa la carga del eje X y Z, adicional se incluye la carga distribuida producida por la plancha de MDF que se colocara sobre la estructura.

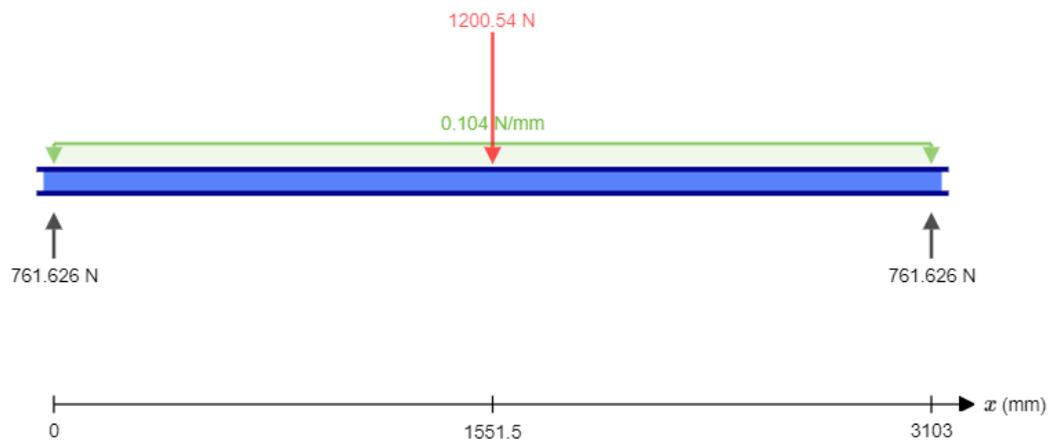


Figura 30. Diagrama de cuerpo libre de la estructura del eje X

7.1.3.3.1.1 Diagrama de fuerza cortante

El momento cortante máximo que la viga estará sometida es de 761,626 N, en la Figura 31 se observa que estos valores se ubican en los apoyos y representan las reacciones en dichos puntos.

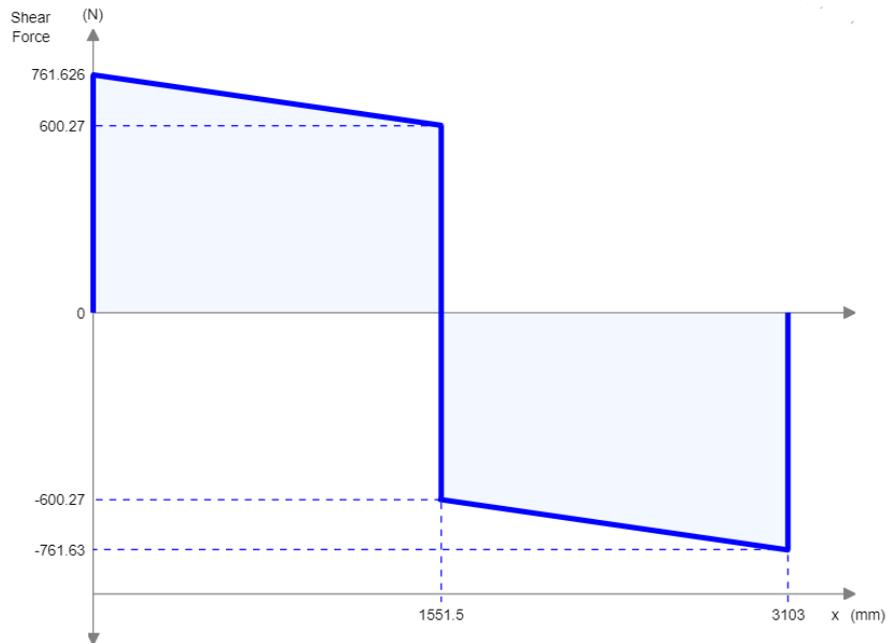


Figura 31. Diagrama de fuerza cortante.

7.1.3.3.1.2 Diagrama de momento flector

En la figura 19 se observa el diagrama de momento flector de la viga, el máximo momento que la viga soportará es de 1056500 N.mm y está ubicada en la mitad de la longitud de la viga, donde la mayor concentración de fuerza está ubicada.

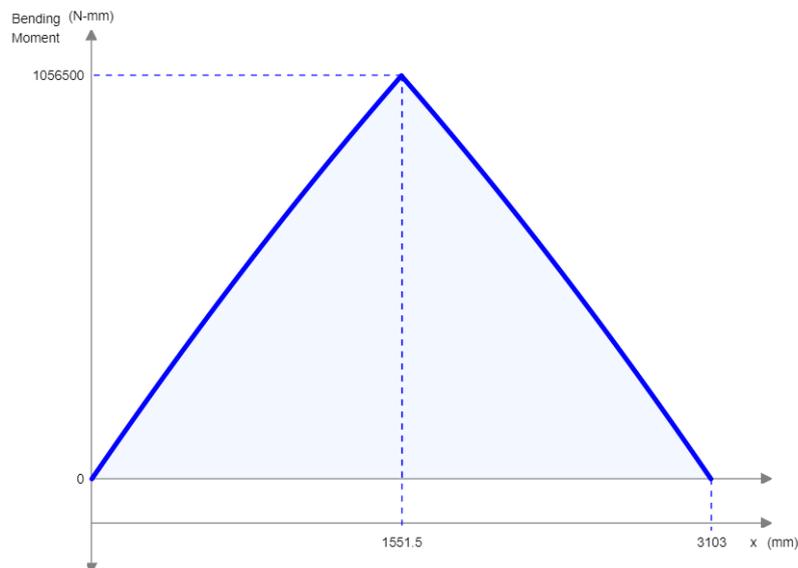


Figura 32. Diagrama de momento flector

7.1.4 Diseño Final

Una vez diseñados los ejes X, Y y Z y cada uno de sus componentes se obtiene el siguiente diseño geométrico final, mostrado en la Figura 33, donde se incorporan los elementos reales con sus características y dimensiones determinadas por sus fabricantes, se generan los planos de construcción para la máquina.

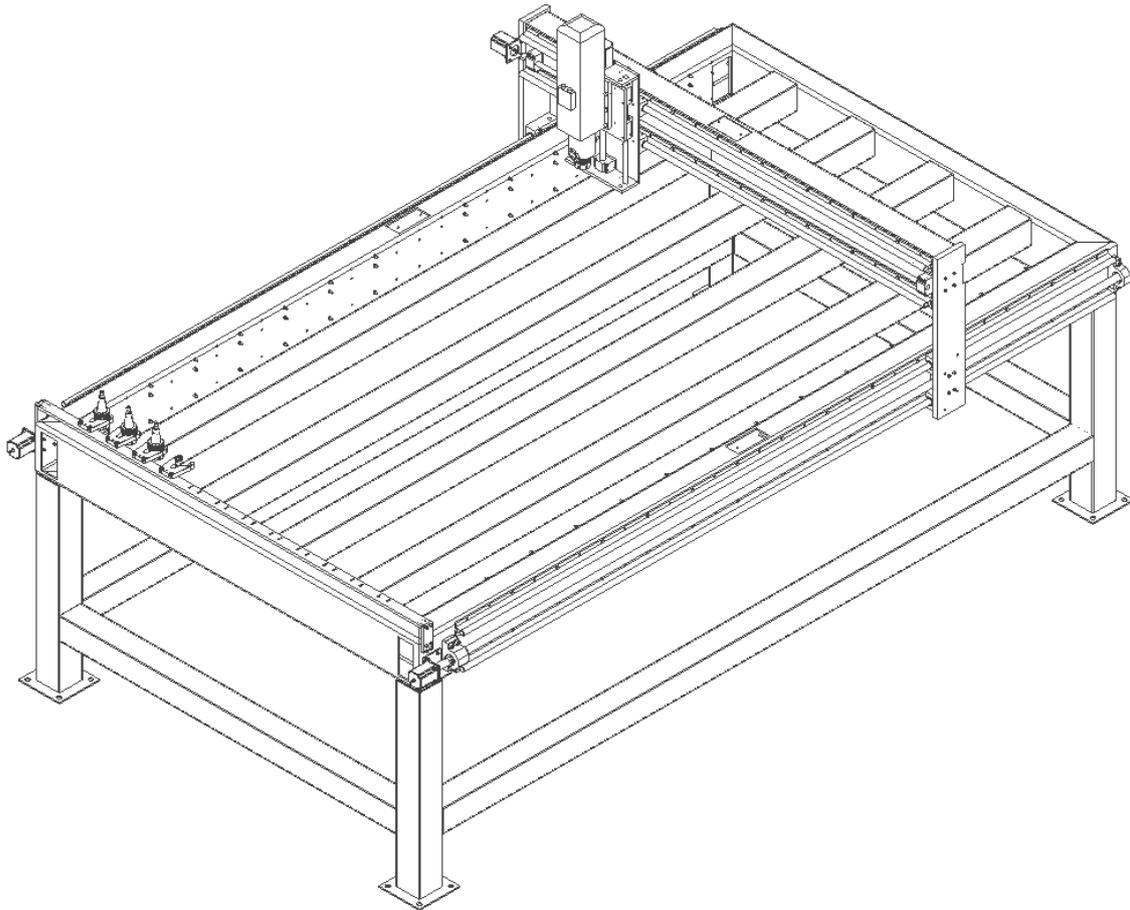


Figura 33. Esquema del router CNC

7.2 DISEÑO ELECTRÓNICO

7.2.1 Selección de Motores Paso a Paso

Para la selección de los motores a paso de los diferentes ejes de la máquina se debe tomar en cuenta el torque de cada uno de los ejes, en la Tabla 21 se detallan los torques requeridos según los cálculos obtenidos anteriormente en el de diseño mecánico.

Tabla 21. Resumen de torques requeridos

Resumen Torques	
Eje	Torque (Nm)
Z	0,496
X	0,13
Y	0,51

Según los torques se selecciona un motor acorde a las especificaciones requeridas, el motor paso a paso 57HSB21A NEMA 23, de la marca Leadshine, se ajusta a las características deseadas, con un torque de 2,1 permite que el motor trabaje a menos de la mitad de su capacidad, asegurando su funcionamiento y durabilidad. Algunas ventajas son:

- Integrado freno de imán permanente, que se acciona al apagar el motor.
- Alta precisión, bajo calentamiento del motor y baja vibración.
- Rodamientos y ejes de alta precisión y calidad.

Las especificaciones generales del motor se detallan en la Tabla 22, el datasheet se encuentra en el Anexo 7.

Tabla 22. Especificaciones generales del motor paso a paso 57HSB21A

MARCA	Leadshine
MODELO	57HSB21A
FASES	2
ÁNGULO DE PASO	1,8°
CORRIENTE/FASE	4 A
HOLDING TORQUE	2,1 Nm
PESO	13 kg
EJE	8 mm

7.2.2 Selección de Drivers para los Motores Paso a Paso

Conociendo la corriente que consume cada motor paso a paso, se determina que el driver debe proporcionar 4 o más amperios para alimentar al motor, debe constar con

control de paso y dirección, alimentación de fuente externa y puesta a tierra de la fuente, el fabricante en la ficha técnica del motor recomienda como driver compatible el EM556S de la marca Leadshine, el cual brinda algunas ventajas como:

- Control de paso y dirección (PUL / DIR) o CW / CCW (doble pulso)
- Ajuste de voltaje de señal de control de 5V / 24V por interruptor DIP, el valor predeterminado es 24V
- 16 configuraciones de micro pasos de 200-25,600 a través de interruptores DIP, o 200-51,200 a través de software (aumento en 200)
- 8 configuraciones de corriente de salida de 1.8-5.6A a través de interruptores DIP, o 0.5-5.6A a través de software
- Tiempo de suavizado del comando de control configurable para reducir la vibración del motor
- Reducción automática de corriente inactiva al 50% o 90%
- Autoconfiguración automática para adaptarse a motores paso a paso NEMA 17, 23 y 24 de amplio rango
- Antirresonancia para un par óptimo, movimiento extra suave, bajo calentamiento del motor y ruido
- Arranque suave sin "salto" cuando se enciende
- Entradas ópticamente aisladas
- Salida de falla y salida de freno
- Protecciones contra sobretensión y sobre corriente

Las especificaciones principales se detallan en la Tabla 23, el datasheet del driver se encuentra en el Anexo 8.

Tabla 23. Especificaciones generales del driver

MARCA	Leadshine
MODELO	EM556S
FASES	2
FRECUENCIA MÁX.	200 kHz
RANGO DE VOLTAJE DE ENTRADA	20-50 VDC
RANGO DE CORRIENTE LÓGICA	7-16 mA

En la Figura 34 se observa el driver del modelo elegido.



Figura 34. Driver EM556S marca Leadshine

7.2.3 Selección de la Fuente de Alimentación

La fuente de alimentación debe cumplir con el voltaje y la corriente que los drivers requieran, el voltaje de trabajo de los drivers es de 20 a 50 VDC, por lo que el voltaje de fuente elegido es de 48 VDC, valor de las fuentes en el mercado. La corriente que debe suministrar es para dos drivers que alimentan a 2 motores de 4 A cada uno, se elige una fuente que proporcione una corriente un poco superior a la requerida con el fin de evitar pérdidas de corriente lo que genera pérdidas de torque, la corriente elegida es de 10 A. La fuente seleccionada es RPS4810, en la Tabla 24 se observa las especificaciones generales, el datasheet se incluye en el Anexo 9.

Tabla 24. Especificaciones generales de la fuente de alimentación

MODELO	RPS4810
VOLTAJE DE SALIDA	48 VDC
CORRIENTE NOMINAL	10.4 A
CORRIENTE PICO	12.5 A
POTENCIA NOMINAL	500 W
POTENCIA PICO	600 W
VOLTAJE DE ENTRADA	176-265 VAC
PESO	1.12 kg

Con los datos de RPS4810 se determina que se deben utilizar 2 fuentes para alimentar a cada par de drivers, de esta forma evitamos tener perdidas de tensión y corriente, la fuente se observa en la Figura 35.



Figura 35. Fuente de poder RPS4810 marca Leadshine

7.2.4 Selección del Controlador

El controlador se encarga de interpretar el código G que el software envía, permitiendo que los motores paso a paso y el spindle se muevan a determinadas velocidades y posiciones, un control modular permite incrementar la cantidad de prestaciones de la tarjeta controladora, donde se busca tener mayor cantidad de entradas y salidas con el fin de tener un mayor control y automatización de la máquina, para elegir el controlador se debe tener en cuenta los siguientes requerimientos:

- El controlador debe tener salidas suficientes para controlar 4 drivers de motores a paso o más, y ser compatible con los mismos, tener salidas de pulso y dirección.
- Tener alimentación independiente a 110 o 220 VAC y 60 Hz.
- Tener soporte técnico.
- Ser compatible con un software versátil como Mach 3.
- Facilidades de conexión al computador mediante puertos estándar.

Se selecciona el controlador MP3700 de la marca CandCNC, esta empresa americana al ser dedicada a la industria de las maquinas CNC, cumple con los requerimientos analizados, cuenta con amplia gama de suministros para equipos CNC a un costo accesible.

Algunas de las características más relevantes del controlador se listan a continuación:

- Cable de alimentación (enchufe de entrada IEC). AC universal de 100 a 240 VAC 50/60 Hz.
- Panel de instrumentos compacto con 16 entradas aisladas y filtradas para límites, referencias, paros de emergencia, sensores, etc.
- Conexión directa Ethernet que puede controlar más de 8 motores.
- Modulo MTA250 con 8 terminales de conexión directa de paso y dirección para drivers de motores a paso.
- Kit de cables de conexión directa para controlador, módulos y CPU, con la facilidad de estar hasta 15 metros separados unos de otros sin tener ningún tipo de ruido en las señales.
- Conexión por puerto serial y paralelo.
- Dos salidas de relé para trabajar con elementos de AC de más de 15 A.
- Incluye CPU con Linux y el software CommandCNC, también es compatible con el software Mach 3 para trabajar en Windows.
- Integra sistema CAD-CAM mediante los softwares Inkscape y SheetCAM.
- Soporte técnico en software y hardware.

Se observa el controlador en la Figura 36.



Figura 36. Controlador MP3700

7.2.5 Selección de Sensor de Posicionamiento

Se utiliza sensores de posicionamiento para seguridad de la máquina y del usuario, dos sensores en cada eje de funcionamiento, uno al principio y uno al fin del recorrido de cada eje, se selecciona sensores inductivos por ser de alta duración, uso industrial y no presentan un desgaste debido al uso, se observa en la Figura 37, a continuación, se indican algunas ventajas:

- No responden a líquidos, plásticos, maderas, contacto con el hombre, beneficiando al proceso de manufactura de la router CNC
- Rango de funcionamiento de 2 mm a 4 mm
- Carcasa de acero inoxidable
- Protección contra inversión de polaridad y cortocircuito
- Indicador de estado mediante LED
- Alimentación 10-30 VDC



Figura 37. Sensor inductivo

Los datos técnicos del sensor inductivo seleccionado se muestran en el Anexo 10.

7.3 LÓGICA DE FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA

La máquina debe cumplir con una lógica de funcionamiento que se ve resumida en el diagrama de flujo presentado en la Figura 38, esta no incluye la preparación y generación del código G del archivo que se va a trabajar para el mecanizado.

7.3.1 Diagrama de flujo

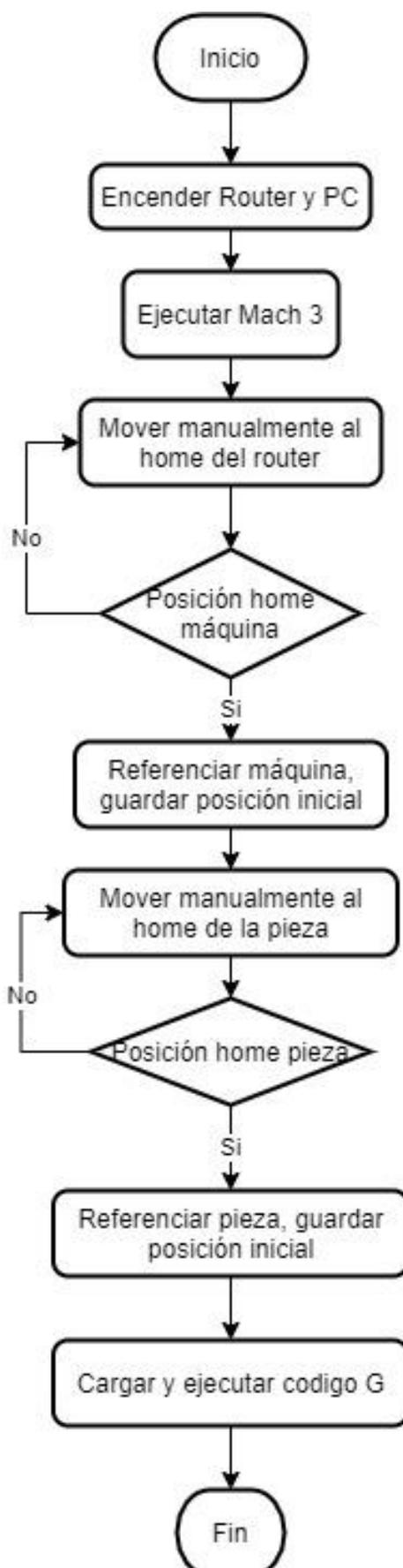


Figura 38. Diagrama de flujo del router CNC

7.3.2 Selección de la Interfaz Máquina – Usuario (HMI)

Como HMI se utiliza el software Mach 3, que es especializado en centros de mecanizado CNC, donde se observa una pequeña simulación de los movimientos realizados por el actuador, así como también velocidad del spindle, posición de los motores de los ejes X, Y y Z, control de avance, se puede visualizar el código G que se ejecuta en tiempo real, realizar paro de emergencia desde el software y alarmas varias que el sistema pueda presentar durante la operación de mecanizado, en la Figura 39 observamos la interfaz presentada por Mach 3.

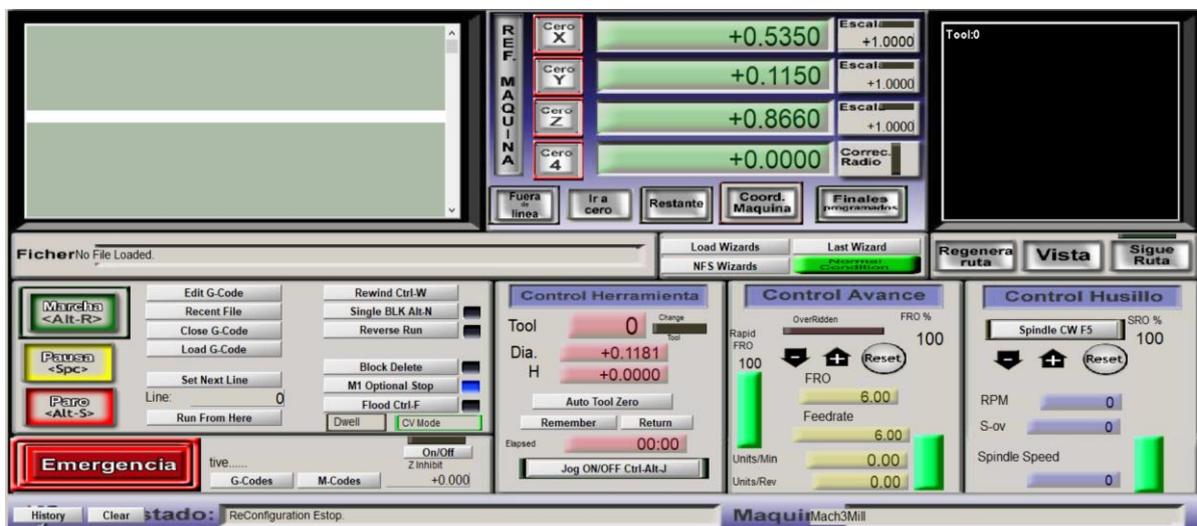


Figura 39. HMI Mach 3

7.3.2.1 Protocolo de Puesta en Marcha o de Calibración

Una vez instalado el software Mach 3 y ejecutado, se debe configurar los parámetros enumerados a continuación, para ello primero ingresar y seleccionar la pestaña config de la barra de menú:

1. Configurar las unidades nativas con las que se trabaja, seleccionar mm o pulgadas según sea el caso.
2. Configurar puertos y pines, una vez que el controlador MP3700 sea conectado y reconocido por el ordenador se tiene:
 - 2.1. Configurar puerto #1 con la respectiva dirección que se asigna automáticamente, para verificar esta dirección ingresar a administrador de dispositivos del ordenador y verificar la dirección asignada, el puerto #2 solo si

se tiene instalado otro puerto y se conecta el mando a distancia o una tarjeta de expansión de entradas y salidas (I/O) si el caso amerita, establecer la velocidad kernel a 45000 Hz, verificar el funcionamiento adecuado, este parámetro depende del procesador de cada ordenador y de la resolución de pasos que se desee para el motor.

- 2.2. Establecer los pines de salida que van conectados a los drivers de los motores, se tiene un pin para la señal de paso y otro para dirección, obtenemos los valores del catálogo del controlador MP3700 del Anexo 12, en la Figura 40 se indica la configuración de pines. El controlador incorpora una tarjeta de control MTA250 donde se conectan los drivers de los motores y el spindle, se indica la forma de hacerlo en el Anexo 11.

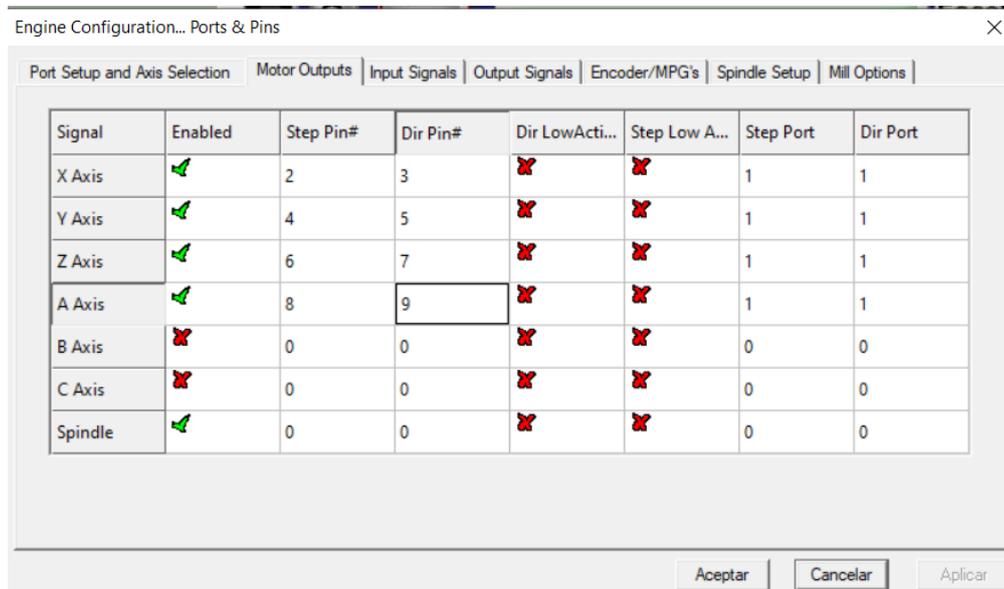


Figura 40. Configuración de pines de salida

- 2.3. Se establecen las señales de entrada al control, aquí se ubican los fines de carrera o sensores ópticos y el paro de emergencia, los pines designados dentro de la tarjeta I/O, el diagrama de conexión y la configuración de la misma se indica en el Anexo 11. En la Figura 41 se observa la configuración de pines resultante.

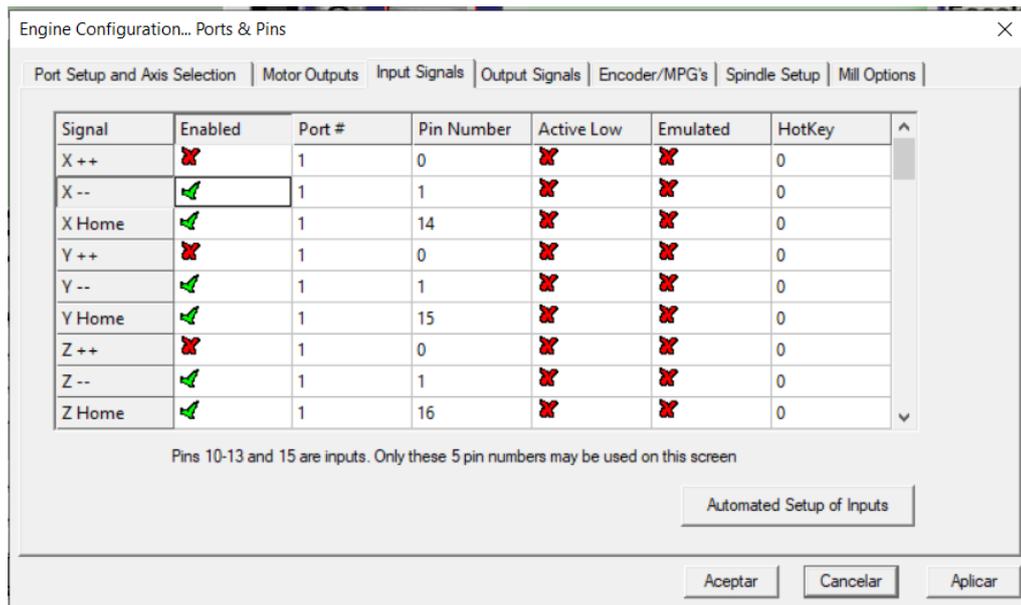


Figura 41. Configuración de señales de entrada

- 2.4. Si se requiere de salidas extras para configurar elementos como extractor de viruta, cambio de herramienta automático, bomba de refrigerante, activar el compresor entre otras, se utiliza las señales de salida como sea requerido.
3. En la puesta a punto y configuración de los motores se establece los valores de avance, velocidad y aceleración de cada uno de estos para cada eje, también para el spindle, en la Figura 42 se observa la forma de configurar cada motor, una vez que se tenga la configuración se debe guardar antes de seguir con el siguiente motor.

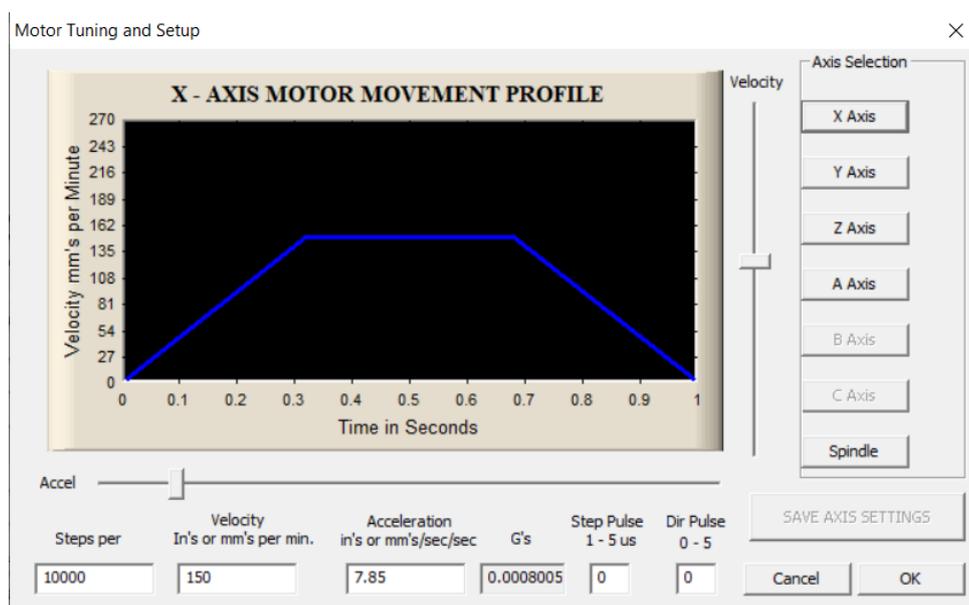


Figura 42. Puesta a punto del motor del eje X

4. Se configura los límites y referencias de trabajo, con esto se asegura mediante software que la router CNC no se saldrá de su volumen de trabajo, a más de tener limitaciones electrónicas mediante los sensores ópticos, en la Figura 43 se observa la forma de configurar, que está en base a los límites de operación de la router CNC, se observa que el eje Z se encuentra invertido, debido a que el home de la máquina se encuentra en el límite superior.

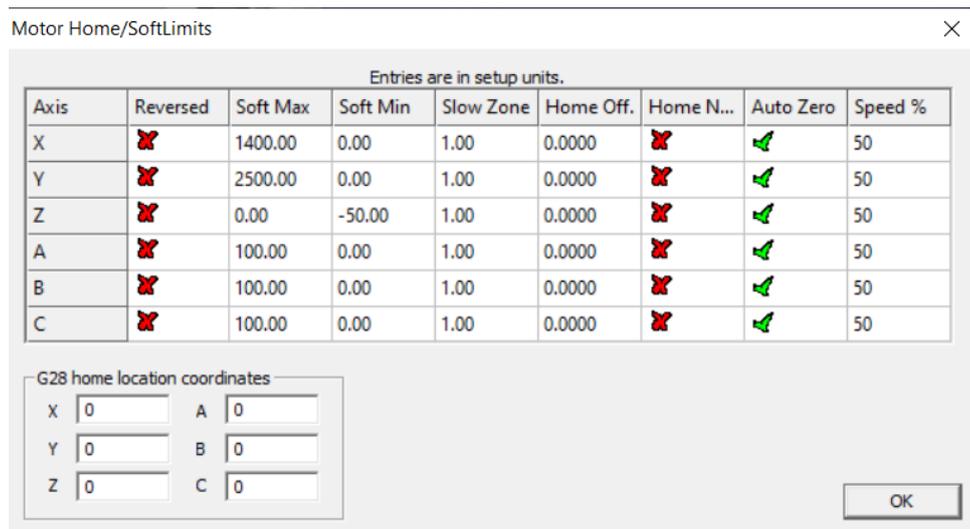


Figura 43. Configuración por software de límites y referencias

5. Los ejes esclavos se configuran solo si se lo requiere, en el caso de la router CNC el eje Y consta de 2 motores por lo que el segundo motor se encuentra conectado en el eje A, se debe configurar este para que funcione a la par del eje Y, como se muestra en la Figura 44.



Figura 44. Configuración ejes esclavos

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El área final de trabajo de la máquina es de 1500 x 2600 mm², cubriendo las especificaciones de dimensiones de un tablero estándar que son de 1220 x 2440 mm².
- El software Mach 3 se ejecuta como HMI, se puede visualizar datos como posición de motores a paso, alarmas de fines de carrera, paro de emergencia, velocidad de husillo entre otros parámetros que nos permiten estar al tanto del funcionamiento en tiempo real de la máquina.
- La selección de dos fuentes de alimentación RPS4810 marca Leadshine, suministran 20,8 A al sistema de drivers que consume 16 A a máxima carga, suministro suficiente para evitar pérdidas de corriente.
- La selección de una fresa de diámetro 3 mm, junto con los avances y velocidades recomendados para MDF ayudan a desbastar correctamente el material y no despostillarlo.
- Respetar las tolerancias geométricas y dimensiones establecidos en los planos anexados.
- Seguir indicaciones de instalación y mantenimiento de los fabricantes de los elementos adquiridos por catálogo.
- Al utilizar guías lineales con bases ya rectificadas, no se requiere rectificar la superficie donde será instalada, más tener en cuenta la correcta alineación para no sufrir deformaciones de la base de la guía lineal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] J. Quimbita, "Diseño y construcción de un Router CNC para la fabricación de puertas de MDF", Ingeniería Electromecánica. ESPE, Latacunga - Ecuador, 2008.

[2] S. Palma. "Propuesta de diseño para la fabricación de máquina automatizada para optimizar la operación de cortes rectos en la manufactura de muebles en melamina", Ingeniería Industrial, Universidad Ricardo Palma, Lima – Perú, 2012.

[3] "Suggested Cutting Speeds for Machining", me.umn.edu, 2012. [Online]. Available: <http://www.me.umn.edu/courses/me3221/handouts/cuttingSpeeds.pdf> [Accessed: 19-Jun- 2019].

[4] "Speed & Feeds", www.pdsspindel.de, 2019. [Online]. Available: <https://www.pdsspindel.de/en/application-data/speed-feeds> [Accessed: 19- Jun- 2019].

[5] J. Hanna, "Diseño y construcción de una máquina etiquetadora semiautomática para botellas cilíndricas con etiquetas autoadhesivas", Ingeniería en Mecatrónica, Universidad Internacional del Ecuador, Quito – Ecuador, 2017.

[6] "RATTM MOTOR 4.5 kW", Aliexpress.com, 2018. [Online]. Available: https://es.aliexpress.com/item/32950077012.html?storeId=907217&spm=a2g1y.12024536.productList_35016617.subject_6. [Accessed: 19- Jun- 2019].

[7] NBS. Inc., Catálogo de Sistema de Guiado Lineal, Barcelona, España, 2012.

[8] SKF.com, Unidades y rodamientos lineales para ejes prelubricados de fábrica SKF, SUECIA, 2011.

[9] SKF.com, Husillos de bolas laminados de precisión SKF, SUECIA, 2013.

[10] R. Malpica, "Fuerzas y potencia en el corte de metal", <https://es.slideshare.net/RonnyMalpica/fuerza-y-potencia-en-el-corte-de-metal>, 2015.

[11] DORMER, "Catalogo DORMER", <https://es.slideshare.net/anita0909/catalogo-dormer>, 2012.

[12] R. Budynas, J. Murrieta and J. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Novena edición. México D.F: McGraw-Hill Interamericana, 2012.

[13] IPAC, Tubería Estructural Rectangular, [online]. Available at: <http://www.ipac- acero.com/producto-detalle.php?id=10>. [Accessed: 24 Jun 2019].

[14] S. Martínez. Diseño y construcción de una máquina de control numérico con control en tiempo real mediante dispositivo apuntador. (2011) <http://hdl.handle.net/10251/12073>.

- [15] C. Riba. Diseño Concurrente. Primera Edición, Ediciones UPC. España, 2004.
- [16] A. Quintero. Construcción e implementación de un prototipo de router o fresadora mediante control numérico computarizado (CNC) con soporte en MACH3, Venezuela (2015).
- [17] R. Budynas; J. Keith. Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, Octava Edición, McGraw Hill Ed. México, 2008.
- [18] Koren Y, Computer control of manufacturing systems, McGraw Hill Ed. 1997.
- [19] "HEXA CNC", Hexacnc.com, 2017. [Online]. Available: <http://hexacnc.com/Datacut-Sleek.html>. [Accessed: 07- Nov- 2017].
- [20] "fresadoras cnc - borja faus miret", Cncgan.com, 2017. [Online]. Available: <http://www.cncgan.com/>. [Accessed: 07- Nov- 2017].
- [21] Y. Li, Q. Liu, J. Xiong, J. Wang, "Research on data sharing and intelligent CNC machining system", Mechatronics and Automation (ICMA), 2015.
- [22] J. Xing, W. T. Sun, "The design and implementation of CNC system based on the circular buffer", System Science and Engineering (ICSSE), 2012.
- [23] J. P. Rogelio and R. G. Baldovino, "Development of an automatic tool changer (ATC) system for the 3-axis computer numerically-controlled (CNC) router machine: Support program for the productivity and competitiveness of the metals and engineering industries," Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM), Palawan, 2014.
- [24] E. Caicedo, "Diseño e implementación de una máquina router CNC de 4 ejes para el tallado de modelos 3D en madera", Ingeniería en Mecatrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí - Ecuador, 2017.
- [25] "Volks CNC 3020 GT. Mecanizado de composite y placas" - Volkscnc.com, 2017 [online] Available at: <http://www.volkscnc.com/volkscnc-3020.html> [Accessed: 7- Nov. 2017].
- [26] "Fresas para Router", Micarpinteria.com, 2018. [Online]. Available: <https://micarpinteria.wordpress.com/2012/01/30/brocas-para-router/>. [Accessed: 17- Abr- 2018].
- [27] R. L. Mott, Diseño de Elementos de Máquinas, México D. F.: University of Dayton, Pearson Educación, Cuarta, Ed. 2006.