



**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 EN MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA  
ROUTER CNC DE 4 EJES PARA EL TALLADO DE MODELOS  
3D EN MADERA**

**AUTORES: CAICEDO GUERRA, ELI DAMIAN  
PILLAJO ALMACHI, CRISTIAN JAVIER**

**DIRECTOR: ING. MORILLO, DIEGO**

**SANGOLQUÍ**

**2017**



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

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA ROUTER CNC DE 4 EJES PARA EL TALLADO DE MODELOS 3D EN MADERA”**, realizado por los señores: **CAICEDO GUERRA ELI DAMIAN** y **PILLAJO ALMACHI CRISTIAN JAVIER**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **CAICEDO GUERRA ELI DAMIAN** y **PILLAJO ALMACHI CRISTIAN JAVIER** para que lo sustenten públicamente.

**Sangolquí, 17 de febrero de 2017**

---

Ing. Morillo Diego

**DIRECTOR**



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

### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **CAICEDO GUERRA ELI DAMIAN** con cédula de identidad N° 1804494647 y **PILLAJO ALMACHI CRISTIAN JAVIER** con cédula de identidad N° 1712981966 declaramos que este trabajo de titulación "**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA ROUTER CNC DE 4 EJES PARA EL TALLADO DE MODELOS 3D EN MADERA**" 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, 17 de febrero de 2017



---

Caicedo Guerra Eli Damian

C.C. 1804494647



---

Pillajo Almachi Cristian Javier

C.C. 1712981966



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

### AUTORIZACIÓN

Nosotros, **CAICEDO GUERRA ELI DAMIAN** y **PILLAJO ALMACHI CRISTIAN JAVIER**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA ROUTER CNC DE 4 EJES PARA EL TALLADO DE MODELOS 3D EN MADERA**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 17 de febrero de 2017



---

Caicedo Guerra Eli Damian  
C.C. 1804494647



---

Pillajo Almachi Cristian Javier  
C.C. 1712981966

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a mis padres, hermanos, familia, a Fabiola Calderón y Cautincito por su apoyo incondicional a lo largo de todo este camino.

*Eli Damian Caicedo Guerra*

## DEDICATORIA

A la memoria de mi padre, que desde lo más alto del cielo me guía por el camino correcto y que de seguro estaría orgulloso de verme culminar esta etapa de mi vida.

*Cristian Javier Pillajo Almachi*

## AGRADECIMIENTOS

A Dios

*Eli Damian Caicedo Guerra*

## **AGRADECIMIENTOS**

Principalmente a Dios, sin él nada sería posible.

A mi madre, hermano y familia que son mi motor para seguir adelante.

A mis amigos de Universidad por brindarme su amistad por muchos años.

*Cristian Javier Pillajo Almachi*

## ÍNDICE

<b>CARÁTULA</b>	
<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>ii</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>iii</b>
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xv</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xviii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xix</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del Problema .....	1
1.2. Antecedentes .....	1
1.3. Justificación .....	2
1.4. Objetivos .....	2
1.4.1. Objetivo General .....	2
1.4.2. Objetivos Específicos.....	2
1.5. Alcance del Proyecto .....	3
1.6. Metodología .....	4
1.7. Estructura del Documento.....	5
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>6</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>6</b>
2.1. Talla en Madera .....	6
2.1.1. Definición .....	6
2.1.2. La Madera.....	6
2.1.3. Propiedades Físicas .....	6
2.1.4. Propiedades Mecánicas.....	7
2.2. Transformación de la Madera .....	8
2.2.1. Aserrado .....	8

2.2.2.	Cortes .....	8
2.2.3.	Torneado .....	8
2.2.4.	Fresado.....	8
2.2.5.	Taladrado.....	8
2.2.6.	Lijado .....	9
2.2.7.	Herramienta CNC .....	9
2.3.	Parámetros de Corte.....	9
2.3.1.	La Fresa.....	9
2.3.2.	El Proceso de Fresado .....	10
2.4.	Máquina de Control Numérico Computarizado .....	11
2.4.1.	Clasificación.....	12
2.5.	Elementos Mecánicos .....	13
2.5.1.	Husillos de Bola .....	13
2.5.2.	Piñón Cremallera .....	13
2.5.3.	Tornillos de Potencia .....	14
2.5.4.	Guía Lineal con Rodillos Guía .....	14
2.5.5.	Guía Circular con Rodamiento Lineal .....	15
2.5.6.	Mandril y Contrapunto.....	15
2.5.7.	Modos de Sujeción .....	15
2.6.	Elementos Eléctricos.....	16
2.6.1.	Motor Paso a Paso .....	16
2.6.2.	Servomotor .....	16
2.6.3.	Driver de Motor Paso a Paso.....	17
2.6.4.	CNC Breakout Board .....	17
2.6.5.	CNC Motion Controller.....	18
2.6.6.	Sensor Final de Carrera.....	18
2.7.	Software y Programación .....	19
2.7.1.	Programación de Control Numérico.....	19
2.7.2.	DeskProto .....	19
2.7.3.	Mach3 .....	20
2.7.4.	LinuxCNC .....	20
2.8.	Normas de Seguridad .....	21
2.8.1.	Seguridad en Máquinas.....	21

<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>22</b>
<b>DISEÑO MECATRÓNICO .....</b>	<b>22</b>
3.1. Características del Diseño .....	22
3.2. Alternativas de Diseño .....	23
3.2.1. Transmisión y Transformación de Movimiento .....	23
3.2.2. Movimiento Lineal.....	25
3.2.3. Motores.....	26
3.2.4. Dispositivo de control.....	28
3.2.5. Software de control.....	29
3.3. Diseño del Sistema Mecánico.....	31
3.3.1. Dimensionamiento Estructural.....	31
3.3.2. Fórmulas y Cálculos para Fresado .....	32
3.3.3. Fórmulas y Cálculos para Taladrado .....	35
3.3.4. Análisis de Guías Lineales en Eje Z .....	38
3.3.5. Análisis de Guías Lineales en Eje Y .....	45
3.3.6. Análisis de Guías Lineales en Eje X .....	49
3.3.7. Determinación de Diámetros de Husillos de Bola.....	52
3.3.8. Cálculo de Torques de los Motores a Pasos .....	56
3.4. Diseño del Sistema Eléctrico y Control de Señales .....	63
3.4.1. Requerimientos Eléctricos y de Control.....	63
3.4.2. Diseño de Potencia.....	64
3.4.3. Sistema de Control .....	70
3.4.4. Gabinete de Control.....	74
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>75</b>
<b>CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN.....</b>	<b>75</b>
4.1. Diagrama de Procesos de Construcción.....	77
4.1.1. Fabricación de Soporte Para Eje Z.....	78
4.1.2. Base para Guía Lineal del Eje X.....	79
4.2. Detalle de Construcción .....	80
4.2.1. Soporte de la máquina.....	80
4.2.2. Partes y piezas .....	80
4.2.3. Alineación de Ejes .....	81
4.2.4. Pintura .....	81

4.2.5. Mesa de trabajo .....	82
4.2.6. Ensamble Final .....	83
4.3. Implementación de Control Numérico .....	83
4.3.1. Cableado Eléctrico y Electrónico .....	84
4.3.2. Tablero de Control. ....	84
4.4. Tiempos de Producción .....	85
4.4.1. Tiempo de Construcción .....	85
4.4.2. Tiempo de ensamblaje.....	86
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>87</b>
<b>PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b>	<b>87</b>
5.1. Control Estadístico de Procesos .....	87
5.1.1. Carta de Control para Eje X.....	88
5.1.2. Carta de Control para Eje Y .....	91
5.1.3. Carta de Control para Eje Z .....	93
5.1.4. Carta de Control para Eje A.....	96
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>99</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>101</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>102</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>105</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características previas al diseño. ....	22
Tabla 2. Cuadro comparativo de los sistemas de transmisión. ....	24
Tabla 3. Ponderación de los sistemas de transmisión. ....	24
Tabla 4. Cuadro comparativo de los sistemas de movimiento lineal. ....	25
Tabla 5. Ponderación de los sistemas de movimiento lineal. ....	26
Tabla 6. Cuadro comparativo entre motores. ....	26
Tabla 7. Ponderación de los tipos de motores. ....	27
Tabla 8. Cuadro comparativo de los dispositivos de control. ....	28
Tabla 9. Ponderación de los dispositivos de control. ....	28
Tabla 10. Cuadro comparativo del software de control. ....	29
Tabla 11. Ponderación del software de control. ....	30
Tabla 12. Parámetros de corte del fresado. ....	34
Tabla 13. Parámetros resultantes del fresado. ....	35
Tabla 14. Parámetros de corte del taladrado. ....	37
Tabla 15. Parámetros resultantes del taladrado. ....	38
Tabla 16. Distancias y fuerzas para el eje vertical. ....	40
Tabla 17. Cargas resultantes en el taladrado. ....	40
Tabla 18. Distancias y fuerza normal para el eje vertical. ....	42
Tabla 19. Cargas resultantes en el fresado. ....	42
Tabla 20. Cargas resultantes presentes en el eje Z. ....	42
Tabla 21. Reacciones y momento flector en guía lineal del eje Z. ....	43
Tabla 22. Distancias y fuerzas para el montaje en la pared. ....	47
Tabla 23. Cargas resultantes en el montaje en la pared. ....	47
Tabla 24. Reacciones y momento flector en guía lineal del eje Y. ....	49
Tabla 25. Distancias y fuerzas para el eje horizontal. ....	50
Tabla 26. Cargas resultantes en el eje horizontal. ....	51
Tabla 27. Reacciones y momento flector en guía lineal del eje X. ....	52
Tabla 28. Valores para la obtención del par motor eje Z. ....	58
Tabla 29. Valores para la obtención de la fuerza total en el husillo eje Y. ...	59
Tabla 30. Valores para la obtención de la fuerza total en el husillo eje X. ...	60
Tabla 31. Características eléctricas requeridas. ....	63

Tabla 32. Corriente para protecciones eléctricas.....	68
Tabla 33. Corriente de operación de los relés. ....	68
Tabla 34. Tiempos de operación en la construcción.....	85
Tabla 35. Tiempos de ensamble.....	86
Tabla 36. Medidas recolectadas de la probeta en dirección del eje X. ....	89
Tabla 37. Límites para carta de control eje X. ....	90
Tabla 38. Medidas recolectadas de la probeta en dirección del eje Y. ....	92
Tabla 39. Límites para carta de control eje Y. ....	92
Tabla 40. Medidas recolectadas de la probeta en dirección del eje Z. ....	94
Tabla 41. Límites para carta de control eje Z.....	95
Tabla 42. Medidas recolectadas de la probeta en dirección del eje A. ....	97
Tabla 43. Límites para carta de control eje A. ....	97

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Representación de la metodología en V mecatrónica. ....	5
Figura 2.- Tipos de fresas y diámetros.....	9
Figura 3.- Profundidades de corte.....	10
Figura 4.- Parámetros de corte en fresado frontal. ....	10
Figura 5.- Desprendimiento de viruta en el maquinado. ....	11
Figura 6.- Potencia y par de apriete de la herramienta. ....	11
Figura 7.- Máquina CNC multiejes.....	12
Figura 8.- Husillo de bolas con circulación interna.....	13
Figura 9.- Sistema mecánico de cremallera y piñón. ....	14
Figura 10.- Tornillo de rosca trapezoidal.....	14
Figura 11.- Guía con rodamientos laterales.....	14
Figura 12.- Guía lineal round rail.....	15
Figura 13.- Mandril de tres dientes con cabeza móvil.....	15
Figura 14.- Motor a pasos de alto torque. ....	16
Figura 15.- Servomotor de tres fases AC.....	16
Figura 16.- Controlador híbrido de dos fases.....	17
Figura 17.- DB25 breakout board.....	17
Figura 18.- USB CNC motion controller. ....	18
Figura 19.- Interruptor fin de carrera. ....	18
Figura 20.- Entorno gráfico DeskProto.....	19
Figura 21.- Pantalla principal Mach3.....	20
Figura 22.- Panel de control virtual LinuxCNC. ....	20
Figura 23.- Diagrama funcional de una CNC de 4 grados de libertad.....	23
Figura 24.- Elementos y dispositivos seleccionados. ....	30
Figura 25.- Representación general de la máquina CNC. ....	31
Figura 26.- Especificaciones de herramientas tupi Dewalt. ....	38
Figura 27.- Diagrama de fuerzas en el eje Z.....	39
Figura 28.- Eje vertical, movimiento a velocidad constante o reposo. ....	39
Figura 29.- Eje vertical con carga normal. ....	41
Figura 30.- Diagramas de corte y momento flector para guía lineal del eje Z. .....	43

Figura 31.- Diagrama de fuerzas en el eje Y. ....	45
Figura 32.- Montaje en la pared, movimiento a velocidad constante o reposo. .....	46
Figura 33.- Diagramas de corte y momento flector para guía lineal del eje Y. .....	48
Figura 34.- Diagrama de fuerzas en el eje X. ....	49
Figura 35.- Eje horizontal, movimiento a velocidad constante o reposo. ....	50
Figura 36.- Diagramas de corte y momento flector para guía lineal del eje X. .....	51
Figura 37.- Tipos de soporte para husillo de bola. ....	53
Figura 38.- Diagrama de selección husillo de bolas eje Z. ....	54
Figura 39.- Diagrama de selección husillo de bolas eje Y. ....	55
Figura 40.- Diagrama de selección husillo de bolas eje X. ....	56
Figura 41.- Accionamiento vertical del husillo de bolas. ....	57
Figura 42.- Accionamiento horizontal del husillo de bolas. ....	58
Figura 43.- DCL fuerzas que intervienen en eje Y. ....	59
Figura 44.- Posicionamiento de la fresa en el stock de trabajo. ....	61
Figura 45.- Posición recomendada de la fresa en el maquinado. ....	61
Figura 46.- Descomposición de la fuerza de corte a 30°. ....	62
Figura 47.- Esquema de conexiones eléctricas ....	64
Figura 48.- Especificaciones eléctricas del motor paso a paso. ....	65
Figura 49.- Operación de pasos y micropasos. ....	65
Figura 50.- Diagrama de potencia unifilar. ....	66
Figura 51.- Diagrama de conexiones de luces indicadoras. ....	69
Figura 52.- Calibre de conductores flexibles de cobre ....	70
Figura 53.- Ubicación de pines del dispositivo de control. ....	71
Figura 54.- Diagrama de los circuitos internos de los pines. ....	71
Figura 55.- Circuito de control para motor a pasos. ....	72
Figura 56.- Circuito de control de la herramienta. ....	73
Figura 57.- Circuito de conexión de sensores fin de carrera y botón de paro. .....	73
Figura 58.- Ubicación de los elementos de potencia y control. ....	74
Figura 59.- Corte de placas de acero por chorro de agua. ....	75

Figura 60.- Taladrado y machuelado en estructura metálica. ....	76
Figura 61.- Ajustaje y acabado en la estructura de soporte de la máquina. ....	76
Figura 62.- Pintado de placas metálicas. ....	77
Figura 63.- Enumeración de partes y piezas de cada eje. ....	77
Figura 64.- Diagrama de procesos para soporte del eje Z. ....	78
Figura 65.- Diagrama de procesos para base eje X. ....	79
Figura 66.- Soporte base de la máquina CNC. ....	80
Figura 67.- Cortes en acero de 3mm por chorro de agua. ....	80
Figura 68.- Ensamble completo de los ejes XYZ. ....	81
Figura 69.- Aspecto final después del pintado. ....	82
Figura 70.- Fabricación de mesa de trabajo. ....	82
Figura 71.- Estructura finalizada. ....	83
Figura 72.- Gabinete y elementos de control. ....	83
Figura 73.- Distribución de los elementos en el espacio asignado. ....	84
Figura 74.- Cableado finalizado. ....	84
Figura 75.- Tablero de control. ....	85
Figura 76.- Valores de proporción para número de subgrupos. ....	88
Figura 77.- Probeta de ranuras en dirección del eje X. ....	89
Figura 78.- Gráfica de valores promedio para eje X. ....	90
Figura 79.- Gráfica de valores del rango para eje X. ....	91
Figura 80.- Probeta de ranuras en dirección del eje Y. ....	91
Figura 81.- Gráfica de valores promedio para eje Y. ....	93
Figura 82.- Gráfica de valores del rango para eje Y. ....	93
Figura 83.- Probeta de perforaciones en dirección del eje Z. ....	94
Figura 84.- Gráfica de valores promedio para eje Z. ....	95
Figura 85.- Gráfica de valores del rango para eje Z. ....	96
Figura 86.- Probeta de perforaciones en superficie circular para eje A. ....	96
Figura 87.- Gráfica de valores promedio para eje A. ....	98
Figura 88.- Gráfica de valores del rango para eje A. ....	98

## RESUMEN

El proyecto detalla el diseño y construcción de una máquina de control numérico computarizado tipo ruteadora de cuatro grados de libertad. Dirigida a SETRA, taller de arte e ilustración, con el fin de facilitar la elaboración de piezas artísticas en diversos materiales. El presente escrito muestra los cálculos mecánicos y eléctricos que permitieron llevar a cabo el proyecto, así también como la construcción y ensayos realizados con el fin de verificar el rendimiento de la máquina herramienta. Los materiales y elementos que la constituyen permiten conseguir una estructura robusta que soporta las cargas mecánicas aplicadas al momento del funcionamiento. Se asegura la protección eléctrica del sistema con la correcta instalación de los componentes de potencia y control. El nivel de detalle que cuenta la máquina puede ser mayor si se realiza una ampliación a seis grados de libertad. El proceso de obtención de figuras es mediante una herramienta rebajadora que permite la remoción rápida del material, sin embargo, la estructura está diseñada de manera modular para que diversos actuadores finales puedan ser adaptados a ella de manera sencilla, haciendo de la máquina una herramienta flexible enfocada al procesamiento de materiales de diferente índole. Se concibe un diseño versátil y eficiente de manera que se disminuye el peso y el costo. Con un volumen de trabajo de 800x500x150mm se logra una excelente relación entre el espacio de trabajo y costos de fabricación de la máquina.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO**
- **ACTUADOR FINAL**
- **PIEZAS ARTÍSTICAS**
- **HERRAMIENTA FLEXIBLE**
- **DISEÑO VERSÁTIL**

## **ABSTRACT**

The Project details the design and construction of a computerized numerical control machine similar to a router machine with four degrees of freedom. Built for SETRA, art and illustration workshop, this machine has the end of facilitating the elaboration of artistic pieces in different materials. The present writing shows the mechanical and electrical calculations which allowed to carry out this project as well as the construction and tryouts made in order to verify the performance of the machine. The materials and elements used in the construction allow having a robust structure that supports the mechanical loads applied when the machine is running. The electrical system has been protected with a correct installation of power and control components. The level of accuracy of the machine can be improved if it is given six degrees of freedom. The process of shaping the pieces is done through a router machine which permits the fast removal of material, however, the structure is customized in a modular form so that end effectors can be adapted to the machine easily, making this machine a flexible tool which works with different kinds of materials. A versatile and efficient design is expected to have a lower weight and price. There should be a direct relation between work performance; this means 800x500x150mm, with work space and costs of the construction of the machine.

## **KEYWORDS**

- **COMPUTER NUMERIC CONTROL**
- **END EFFECTOR**
- **ARTISTIC PIECES**
- **FLEXIBLE TOOL**
- **VERSATILE DESIGN**

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Planteamiento del Problema**

SETRA se dedica a la elaboración del diseño, ilustración y prototipos de maquetas de toda índole, orientado a soluciones didácticas y artes plásticas para todas las especialidades a nivel académico. Se desarrollan piezas variadas en distintos materiales, especialmente en madera, de una forma artesanal y casera lo que presenta una serie de desventajas que se mencionan a continuación:

- Baja producción debido al tiempo empleado en un trabajo.
- Variación en las medidas finales de la pieza.
- Desperdicio de materia prima.
- Dificultad en la réplica de figuras.

Para contrarrestar estos aspectos negativos, se ha optado por una máquina de control numérico computarizado (CNC) la cual mejore la precisión, disminuya tiempos de producción y que reduzca al máximo el desperdicio de recursos.

### **1.2. Antecedentes**

La introducción del concepto de control numérico por computadora se dio a finales de la década de los 40 por parte del norteamericano John T. Parsons, desarrollada para mejorar la producción de piezas en la industria de la aviación. Dicho concepto incluía por primera vez lógica programable a las máquinas que funcionaban mediante tarjetas perforadas, marcando así el inicio de la Segunda Revolución Industrial. Debido a la evolución de la tecnología y la electrónica, las máquinas de control numérico fueron cambiando considerablemente, pasando por cuatro distintas generaciones como son: relés, transistores, circuitos integrados y microprocesadores.

En la actualidad el control numérico es utilizado ampliamente en la industria. Las máquinas herramienta computarizadas de cuatro grados de libertad o comúnmente conocidas como CNC de 4 ejes, están enfocadas en el

mecanizado de metales para la fabricación de piezas mecánicas de alta precisión. Sin embargo, su aplicación ha ido creciendo a tal punto de poder tratar varios materiales debido a su configuración y robustez. Con el avance del software libre, muchas personas han construido sus propios prototipos de máquinas CNC.

Por otra parte, el desarrollo de piezas artísticas talladas en madera es una labor ardua y de precisión. En muchas de las ocasiones toma varios días de trabajo realizar una pieza, por tal motivo el tallado de éstas se hace en maderas suaves, comúnmente balsa, nogal, roble, cedro y haya.

Con este proyecto se pretende impulsar la industrialización del tallado de artesanías, en conjunto con la optimización de la materia prima y con un coste relativamente bajo en comparación con las máquinas actuales.

### **1.3. Justificación**

Un sistema de control numérico computarizado posee flexibilidad en distintos procesos industriales de manufactura, facilitando la producción de elementos de diferente índole. La inclusión de una máquina CNC aporta grandes ventajas como la sencillez de manejo, programación, rapidez y exactitud.

El principal incentivo para llevar a cabo este proyecto es la utilización de nuevas herramientas y tecnología que faciliten la producción de figuras de compleja manufactura, permitiendo el desarrollo de la matriz productiva en el sector de la pequeña y mediana industria dedicada a la elaboración de elementos destinados al ornamento.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo General**

Diseñar e implementar una máquina de control numérico computarizado de 4 grados de libertad para la talla en madera.

#### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Diseñar la estructura mecánica adecuada que permita el movimiento de la herramienta y el material a trabajar.

- Dimensionar y seleccionar los elementos a emplear de manera que garanticen el correcto proceso de tallado.
- Integrar los componentes mecánicos y electrónicos en un sistema mecatrónico.
- Realizar la programación correspondiente para el control de los motores.
- Ejecutar pruebas de funcionamiento en la máquina para verificar la precisión de tallado.

### **1.5. Alcance del Proyecto**

Con el presente proyecto de investigación se desea transformar la actividad de manufactura artesanal en madera, para pasar a la digitalización de modelos personalizados y posteriormente traerlos a la realidad mediante la remoción de material. El sistema integra componentes mecánicos, electrónicos y un correcto control que permitan el desempeño óptimo de la máquina CNC.

La máquina cuenta con cuatro grados de libertad, tres de los cuales se encargan del desplazamiento de la herramienta en un sistema de ejes coordenados, el cuarto se encarga del movimiento rotacional del material a maquinar. El volumen de trabajo deseado en el caso de utilizar únicamente los tres ejes ortogonales XYZ debe ser de 800 x 500 x 150 mm respectivamente y con el eje rotacional obtener figuras de 700 mm de largo y 100 mm de diámetro.

- El proceso inicia modelando el objeto a tallar en un software de diseño asistido por computador CAD. Mediante las herramientas computacionales se da forma a los rasgos hasta obtener la figura completa.
- Este modelo pasa al software DeskProto donde se configura lo pertinente a la manufactura asistida por computadora CAM, obteniendo el Código G necesario. (Para mayor detalle ver sección 2.7.1 y 2.7.2)
- Dada las dimensiones de la figura, se obtiene un stock de materia prima que encierre las medidas de la pieza a realizar y se lo coloca en el cuarto eje rotacional para comenzar con el proceso.

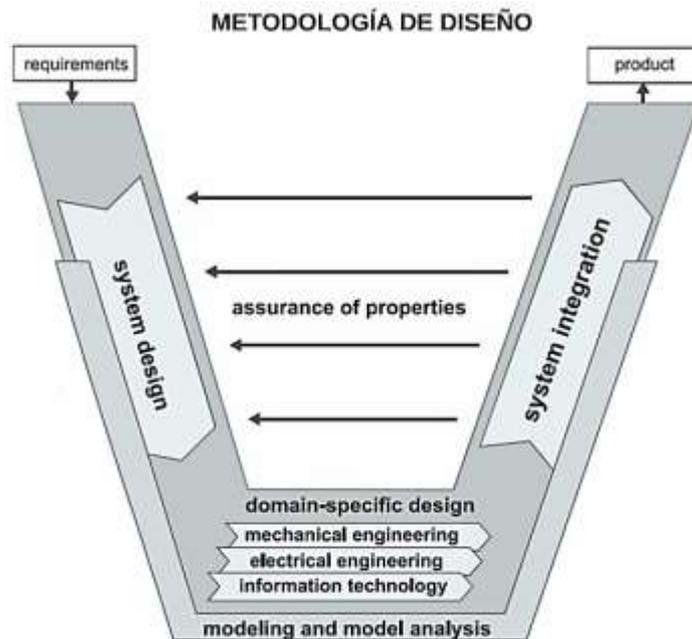
- El Código G es enviado al programa Mach3 (Sección 2.7.3), el cual lo interpreta y ejecuta el movimiento de los ejes para el retiro del material sobrante.
- Para finalizar, se dará un post tratamiento a la figura como lijado o pintura.

### **1.6. Metodología**

Para el desarrollo del sistema mecatrónico se plantea un procedimiento de diseño denominado “Metodología en V”, el cual resume de manera gráfica los pasos que hay que tomar para el desarrollo del sistema. Cuenta con tres secciones:

- La sección izquierda corresponde a la recepción de los requerimientos del proyecto, para pasar al diseño general del sistema.
- La sección central donde se realiza un diseño específico y dimensionamiento, considerando cada uno de los dispositivos mecánicos, eléctricos y de control que formarán parte de la máquina.
- La sección derecha pertinente a la integración de los elementos seleccionados en la sección anterior, de esta manera se logra el producto final.

Cabe recalcar que en cualquier parte de la Metodología en V se podrá hacer una retroalimentación, si esta fuera necesaria, en caso de encontrar errores en el diseño.



**Figura 1.- Representación de la metodología en V mecatrónica.**

**Fuente: (Mosquera, 2016)**

### 1.7. Estructura del Documento

El presente documento se desglosa de la siguiente manera:

El primer capítulo presenta una breve introducción e importancia del proyecto, los objetivos a lograrse, el alcance y metodología que se ocupará para la finalización del mismo.

El segundo capítulo nos introduce al control numérico computarizado, las distintas configuraciones existentes de máquinas CNC y sus componentes, teoría y procesos de tallado en madera.

En el tercer capítulo se encuentran los parámetros de diseño, permitiendo el cálculo y la selección de los componentes mecánicos, electrónicos y de control que conformarán el proyecto en conjunto

El cuarto capítulo detalla la construcción de las partes y piezas que serán integradas a los demás componentes antes seleccionados.

Para concluir, el quinto capítulo presenta una serie de pruebas desarrolladas con la máquina, determinando su efectividad y alcanzando los objetivos planteados. Además de presentar conclusiones y recomendaciones, en anexos se adjuntan planos de construcción mecánicos, electrónicos y diagrama de procesos.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Talla en Madera

##### 2.1.1. Definición

La talla en madera es el proceso de desbaste y pulido por medio de una herramienta de corte, que puede ser manual o automatizada, con el fin de darle una forma específica. Se remonta a la edad media en países del viejo continente, donde se utilizaba el roble como principal materia prima. Las aplicaciones de esta técnica son muy diversas, sin embargo, su principal función es el ornamento arquitectónico y de objetos de uso habitual.

##### 2.1.2. La Madera

Es un material celulósico y muy versátil que se obtiene de los árboles. Mediante un análisis de la estructura celular y la densidad se determina su dureza. Todo tipo de madera puede ser tallada, pero obteniendo diferentes acabados. Algunas de estas se utilizan a nivel estructural debido a su gran resistencia mecánica. Las más utilizadas para tallar son: cerezo, haya, pino, cedro, roble, nogal, entre otras.

##### 2.1.3. Propiedades Físicas

- **Contenido de humedad:** Se refiere a la cantidad de agua contenida en la madera, la cual puede estar presente en los poros o paredes celulares, este valor crece o decrece con los cambios de temperatura y humedad en el ambiente.
- **Higroscopicidad:** Capacidad de absorción de humedad por parte de la madera. Por exceso de humedad se produce abultamientos, caso contrario cuando se seca la madera las fibras se contraen.
- **Densidad:** Relación entre la masa y el volumen de la madera que, a su vez, depende también del contenido de agua. Esta magnitud expresada en ( $g/cm^3$ ) se utiliza para la clasificación de maderas según su peso, a mayor

densidad la durabilidad aumenta así también como la dificultad de ser trabajadas.

- **Contracción y expansión:** Se puede producir de manera tangencial, radial o longitudinal, debido a la pérdida de humedad, en este proceso se pueden producir grietas y torceduras.
- **Flexibilidad:** Cualidad de curvarse sin llegar a romperse y volver a su estado inicial. Las maderas jóvenes tienen mayor flexibilidad ante maderas viejas.

#### 2.1.4. Propiedades Mecánicas

- **Resistencia a la flexión:** Capacidad a resistir cargas que se ejercen de manera transversal a las fibras, aquí se pueden distinguir dos valores importantes, MOE y MOR, módulo de elasticidad en flexión y módulo de ruptura en flexión respectivamente, la primera definida como la resistencia a esfuerzos sin causar deformaciones y la segunda la máxima resistencia cuando las fibras externas se rompen.
- **Resistencia a la compresión:** Resistencia a esfuerzos producidos por fuerzas que tienden a acortar las dimensiones de la madera, éstas pueden ser ejercidas de manera longitudinal o transversal a las fibras.
- **Cizallamiento:** Se produce cuando se ejercen fuerzas en sentido opuestos sobre un mismo plano, a esto se le llama también esfuerzo de corte.
- **Dureza:** Resistencia a la penetración y desgaste, esto depende de factores como la densidad, edad, estructura o disposición de las fibras en el maquinado.
- **Clivaje:** Se denomina así a la resistencia del material a producir rajaduras, pueden ser de dos tipos, tangencial en el que la falla se produce tangencial a los anillos de crecimiento o radial cuando la falla es perpendicular a dichos anillos.
- **Resistencia al corte:** Es la capacidad de soportar fuerzas que separan o dividen en dos a la madera, esta ruptura se da si las fuerzas son paralelas a las fibras y superen la resistencia de corte. (Calleros, 2012)

## **2.2. Transformación de la Madera**

### **2.2.1. Aserrado**

Proceso de transformación que permite obtener bloques escuadrados de caras paralelas, denominadas tablones. Dichos tablones son el material base para la carpintería o la ebanistería.

### **2.2.2. Cortes**

Se los efectúa a través de sierras circulares con movimientos longitudinales (ancho) o transversales (largo), la razón es que se logran piezas de menor tamaño que son mucho más manejables. Otro tipo de corte es el rotatorio el cual remueve en forma de viruta el material sobrante.

### **2.2.3. Torneado**

Forma de trabajar la madera en stocks cilíndricos en toda su longitud, la herramienta cortante se sitúa de manera paralelo o perpendicular a la fibra. En un torno simple la remoción se lo efectúa con herramientas afiladas como gubias, cuchillas de entalle, formón recto. En un torno mecánico, un sistema de acercamiento se encarga de llevar el elemento cortante fijo hacia la superficie de la madera a maquinar.

### **2.2.4. Fresado**

Consiste en la remoción de material por una herramienta rotativa de varios filos conocidas también como dientes de corte, la dirección de movimiento de avance es perpendicular al eje de rotación. Se puede generar superficies planas, además de superficies y formas complejas.

### **2.2.5. Taladrado**

Procedimiento donde se realizan agujeros en bloques de madera mediante el movimiento rotativo de la herramienta.

### 2.2.6. Lijado

Parte manual o mecánica que se encarga de remover las imperfecciones en las superficies, logrando acabados lisos. En muchos casos luego de lijar, se procede a aplicar material de recubrimiento.

### 2.2.7. Herramienta CNC

La remoción de material es mucha más precisa ya que el control numérico se encarga de los movimientos independientes que realiza la máquina en cada uno de sus ejes. (Puertas, Guevara, & Espinoza, 2013)

## 2.3. Parámetros de Corte

### 2.3.1. La Fresa

- **Diámetro de la fresa ( $D_c$ ):** Es la distancia máxima de corte, es la base para el cálculo de la velocidad de corte.
- **Número de dientes ( $z_c$ ):** Es el número de dientes disponibles en la fresa, varía considerablemente y se utiliza para determinar el avance de mesa mientras que el número efectivo de dientes es el número de dientes que actúan realmente en el corte. (SANDVIK, Tecnología del Corte del Metal, 2016).

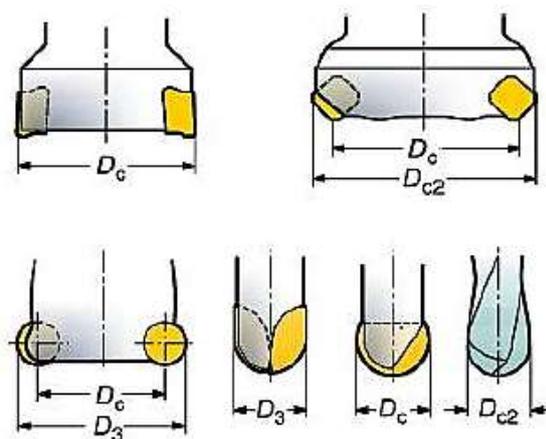


Figura 2.- Tipos de fresas y diámetros.

Fuente: (SANDVIK, 2016)

- **Profundidad de corte radial ( $a_e$ ):** Espacio transversal en la pieza de trabajo por donde actúa el diámetro de la fresa.

- **Profundidad de corte axial ( $a_p$ ):** Porción de material que remueve la fresa a su paso, la distancia se toma por debajo de la superficie sin mecanizar.

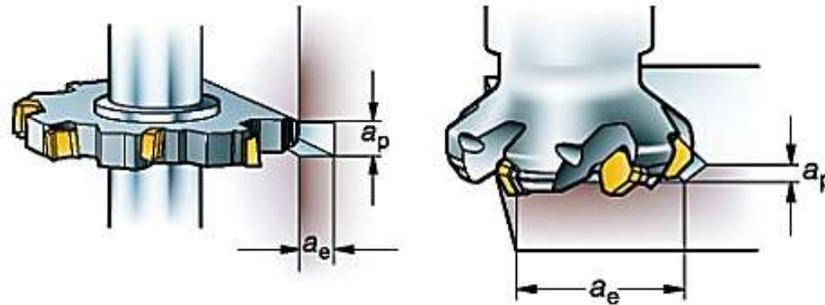


Figura 3.- Profundidades de corte.

Fuente: (SANDVIK, 2016)

### 2.3.2. El Proceso de Fresado

- **Velocidad del husillo ( $n$ ):** Número de giros completos que realiza la herramienta por cada minuto. Valor orientado a la máquina, que se calcula a partir del valor de velocidad de corte sugerido para diferente operación.
- **Velocidad de corte ( $V_c$ ):** Velocidad a la que el filo de la herramienta realiza el desbaste de la pieza. Es lineal y se expresa en  $m/mm$ .
- **Avance por diente ( $f_z$ ):** Distancia lineal que recorre la herramienta mientras se ejecuta el corte con un solo diente.
- **Avance por minuto ( $V_f$ ):** Conocido también como avance de mesa, avance de máquina o velocidad de avance. Distancia que recorre la herramienta por cada minuto transcurrido.

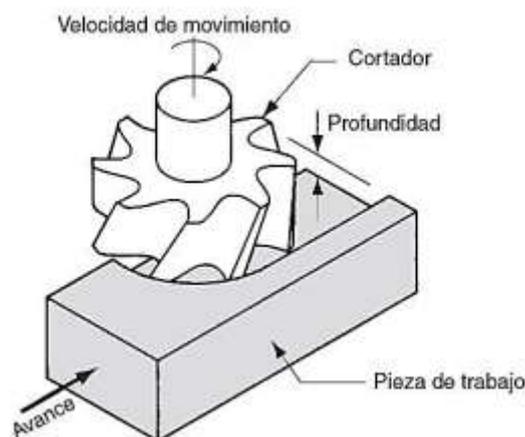
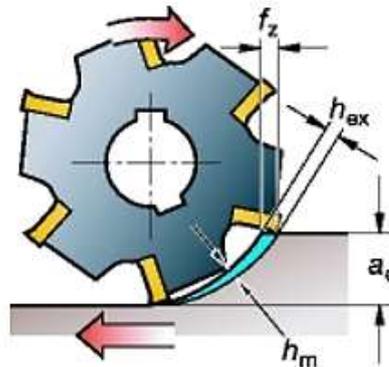


Figura 4.- Parámetros de corte en fresado frontal.

Fuente: (Groover, 2007)

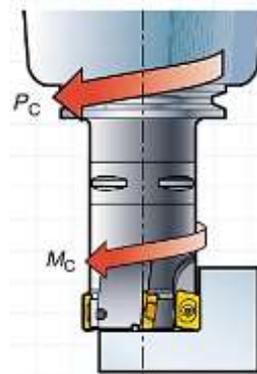
- **Espesor medio de la viruta ( $h_m$ ):** Valor eficaz para la determinación de la fuerza de corte específica y potencia neta.



**Figura 5.- Desprendimiento de viruta en el maquinado.**

**Fuente: (SANDVIK, 2016)**

- **Potencia neta ( $P_c$ ):** Es la potencia que debe ser capaz de proporcionar la máquina para impulsar la acción de mecanizado.
- **Par de apriete ( $M_c$ ):** Es la fuerza que produce la herramienta durante el mecanizado, la máquina debe ser capaz de suministrar esta fuerza.
- **Fuerza de corte específica ( $k_c$ ):** Este valor se puede encontrar en tablas y es constante para cada material. Se expresa en  $N/mm^2$ .



**Figura 6.- Potencia y par de apriete de la herramienta.**

**Fuente: (SANDVIK, Tecnología del Corte del Metal, 2016)**

## 2.4. Máquina de Control Numérico Computarizado

Son máquinas en que la trayectoria de corte se controla por datos numéricos en lugar de plantillas físicas. Las máquinas fresadoras CNC están adaptadas

especialmente para el fresado de perfiles, fresado de cavidades, fresado de contorno de superficies y operaciones de tallado de matrices. (Groover, 2007)

### 2.4.1. Clasificación

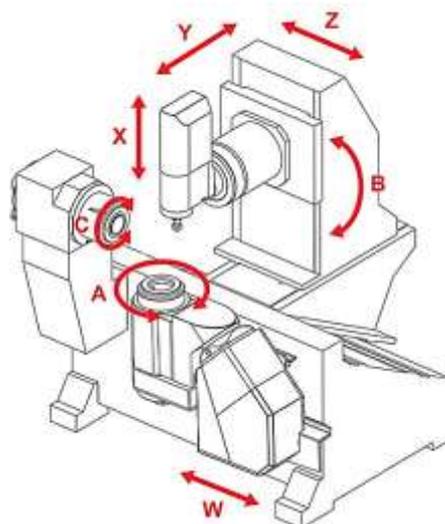
Una de las maneras más habituales de clasificación para las máquinas herramientas CNC es por su número de ejes o también conocidos como Grados de libertad.

#### 2.4.1.1. Por el Número de Ejes

A mayor número de ejes se tiene la posibilidad de un maquinado de mayor complejidad aumentando también la robustez de la máquina.

- **Tres ejes:** Puede trabajar en tres direcciones ortogonales entre sí, permite el maquinado en 2 y 3 dimensiones.
- **Cuatro ejes:** Cumple todas las funciones descritas anteriormente añadiendo la posibilidad de giro de la pieza o de la herramienta, permitiendo un maquinado de revolución.
- **Cinco ejes:** Tiene la posibilidad de rotar la pieza y/o herramienta en 2 de sus ejes.

Es posible ver más ejes que las descritas en máquinas industriales, ya que cuentan con estructuras muy complicadas y con potentes paquetes informáticos para la generación del CAM.



**Figura 7.- Máquina CNC multiejes.**

**Fuente: (DirectIndustry, El salón online de la industria, 2017)**

#### **2.4.1.2. Por la Configuración de su Estructura:**

Características como la rigidez estructural y robustez influyen en la precisión y el área de trabajo. Se pueden encontrar en las siguientes configuraciones:

- Bancada fija y mesa móvil.
- Bancada fija y mesa rototraslante.
- Cabezal fija y mesa móvil.
- Cabezal móvil y mesa fija.
- Columna móvil.

### **2.5. Elementos Mecánicos**

#### **2.5.1. Husillos de Bola**

Elementos de transmisión de potencia equipado con bolas o rodillos que transforman el movimiento rotatorio en lineal. El movimiento rodante minimiza la fricción entre la tuerca y el eje haciendo que el par y la potencia del motor necesarios sean mucho menores. Su eficiencia supera el 80% dependiendo a la aplicación.



**Figura 8.- Husillo de bolas con circulación interna.**

**Fuente: (DirectIndustry, 2017)**

#### **2.5.2. Piñón Cremallera**

Para que se dé el movimiento giratorio y que sea convertido en lineal, los dos elementos deben poseer el mismo módulo. La cremallera se asemeja a una rueda dentada de diámetro primitivo infinito, pero totalmente recta. Este mecanismo es reversible ya que puede desplazar el piñón o la cremallera de forma lineal, dependerá del elemento que se encuentre fijo.



**Figura 9.- Sistema mecánico de cremallera y piñón.**

**Fuente: (Mecalux, 2017)**

### **2.5.3. Tornillos de Potencia**

Mecanismo de transmisión que es capaz de transformar movimiento rotacional en rectilíneo, a costa de un alto roce que produce desgaste y calentamiento entre sus componentes. Para este caso el avance es irreversible debido al ángulo de transmisión.



**Figura 10.- Tornillo de rosca trapezoidal.**

**Fuente: (Tecnopower, 2016)**

### **2.5.4. Guía Lineal con Rodillos Guía**

Con un diseño robusto están diseñados para ofrecer un movimiento lineal preciso con baja fricción y bajo ruido, trabajan en combinación de otros sistemas de carriles rectos o curvos hasta una velocidad de 10 m/s.

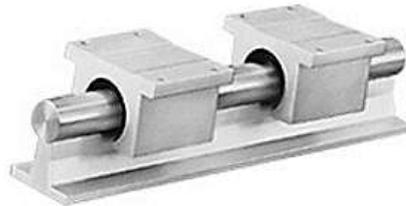


**Figura 11.- Guía con rodamientos laterales.**

**Fuente: (Schaeffler, 2017)**

### 2.5.5. Guía Circular con Rodamiento Lineal

Diseño inherente que ofrece un desplazamiento extremadamente suave, soporte continuo con gran rigidez, larga vida útil y hasta 6 veces más capacidad de carga comparado a otros sistemas lineales. Ventajas de ahorro en tiempo y dinero en lo que demanda la preparación de la superficie de montaje.



**Figura 12.- Guía lineal round rail.**

**Fuente: (Thomson Industries, 2016)**

### 2.5.6. Mandril y Contrapunto

Elemento utilizado para sujetar y transmitir el movimiento rotacional a las piezas de trabajo usualmente cilíndricas, algunos mandriles pueden sujetar objetos de forma irregular debido a sus mordazas o dientes que presentan movimiento independiente.



**Figura 13.- Mandril de tres dientes con cabeza móvil.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

### 2.5.7. Modos de Sujeción

Los sujetadores son un método de unión entre dos o más piezas, utilizados en casi cualquier producto o estructura. Pueden ser permanentes o removibles, se utilizarán dos modos de sujeción los cuales cumplen con normas y estándares internacionales como la American Welding Society (AWS) para cordones de soldadura, la American National Standards Institute

(ANSI) y Deutsches Institut für Normung (DIN) para piezas de fijación como pernos, tornillos, espárragos, tuercas, etc.

## 2.6. Elementos Eléctricos

### 2.6.1. Motor Paso a Paso

Dispositivo electromecánico que posee una gran precisión. Convierte pulsos eléctricos en movimientos angulares determinados dependiendo el control que se le aplique. Una de sus ventajas es que puede mantener su posición mientras las bobinas permanezcan energizadas. El ángulo de giro (paso) tiene un rango de variación que puede ir de los  $90^\circ$  hasta los  $1.8^\circ$ , inclusive puede llegar a dar pasos de  $0.72^\circ$ .



**Figura 14.- Motor a pasos de alto torque.**

**Fuente: (Kollmorgen, 2013)**

### 2.6.2. Servomotor

Es un motor eléctrico con la característica de poder ser controlado tanto en velocidad como en posición. Su relación de par-velocidad lo convierte en una opción idónea para aplicaciones de seguimiento. Al no poseer escobillas no requiere de mantenimiento continuo.



**Figura 15.- Servomotor de tres fases AC.**

**Fuente: (Sinjoe Technology, 2017)**

### 2.6.3. Driver de Motor Paso a Paso

Este dispositivo proporciona la corriente necesaria para el motor, sus entradas reciben señales de baja potencia y gracias a un sistema de micro pasos se tiene un control preciso en el motor.



Figura 16.- Controlador híbrido de dos fases.

Fuente: (Elaboración propia)

### 2.6.4. CNC Breakout Board

Se utiliza como interfaz entre la PC y motores, relés y otros dispositivos que se desea controlar en una máquina CNC. Se conecta al puerto paralelo de la PC convirtiendo la información que recibe en señales que controlan el movimiento de cada uno de sus ejes. Conexión de hasta 6 ejes.

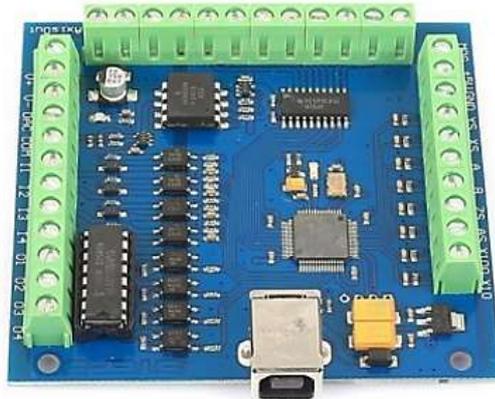


Figura 17.- DB25 breakout board.

Fuente: (RioRand, 2017)

### 2.6.5. CNC Motion Controller

Tarjeta controladora para máquinas CNC con puerto USB que facilita la comunicación entre el ordenador y la máquina enviando o recibiendo señales. Compuesto de microcontroladores que traducen los pulsos eléctricos en movimiento para los motores. Es posible conectar hasta 4 ejes.



**Figura 18.- USB CNC motion controller.**

**Fuente: (Sain Smart, 2016)**

### 2.6.6. Sensor Final de Carrera

También llamado sensor de contacto, es un dispositivo electrónico que tiene como objetivo enviar una señal para modificar el estado de un circuito. Un elemento móvil es detectado tras accionar mecánicamente el sensor que se encuentra en una posición determinada. Estos dispositivos son muy usuales en la industria.



**Figura 19.- Interruptor fin de carrera.**

**Fuente: (Xinling Electrical, 2017)**

## 2.7. Software y Programación

### 2.7.1. Programación de Control Numérico

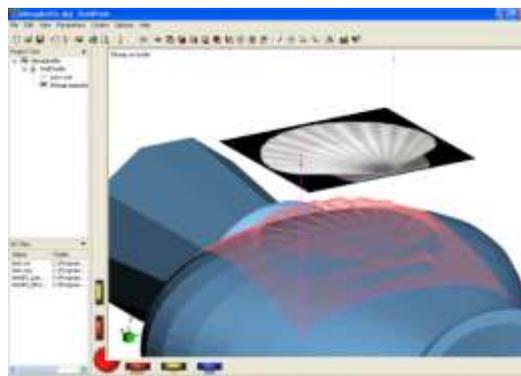
El control numérico es un lenguaje de programación vectorial de bajo nivel conocido como Código G, el cual realiza movimientos simples o de geometría sencilla acompañado con parámetros de manufactura. Se establecen dos tipos de códigos:

- Códigos G (Generales) que se encargan del control de la máquina al desplazarse y realizar movimientos rápidos, avances rectos o radiales, pausas o ciclos sobre la pieza de trabajo.
- Códigos M (Misceláneas) que son funciones especiales para la máquina como encendido, calibración, sentido de giro de la herramienta, inicio de bloques de código, control de refrigerante, entre otros.

### 2.7.2. DeskProto

Programa de manufactura asistida por computadora CAM que enlaza al diseño CAD con las máquinas herramientas. Crea instrucciones detalladas denominadas Código G, maneja archivos Standard Triangle Language (STL) que definen la geometría de objetos 3D de cualquier programa CAD, realiza el cálculo de trayectorias de herramientas CNC y luego escribe archivos de programa de control numérico para máquinas de 3, 4 o 5 ejes.

DeskProto es utilizado por los diseñadores de prototipos, los joyeros de modelos de cera, artistas de esculturas, médicos para prótesis, los fabricantes de moldes, carpinteros, maestros, estudiantes, aficionados y muchos más. (DeskProto, 3D CNC MACHINING FOR NON-MACHINISTS, 2017)



**Figura 20.- Entorno gráfico DeskProto.**

**Fuente: (DeskProto, 2017)**

### 2.7.3. Mach3

Mach3 convierte un ordenador típico en un controlador de la máquina CNC. Presenta características que son de gran valor para aquellos que necesitan un paquete de control de CNC. Mach3 está disponible para el sistema operativo Windows en sus versiones XP, Vista y 7. Controla el movimiento de los motores (paso a paso y servo) mediante el procesamiento de Código G. (Newfangled Solutions, 2016)

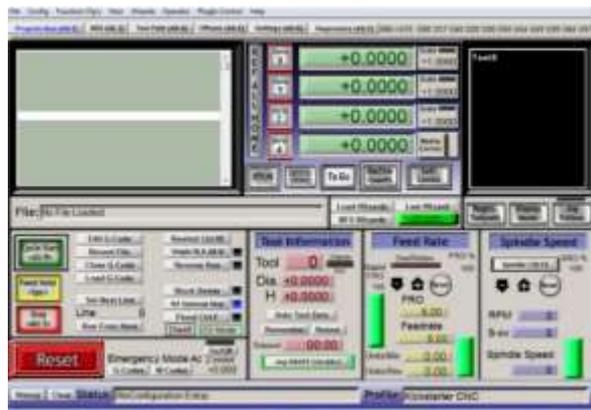


Figura 21.- Pantalla principal Mach3.

Fuente: (Elaboración propia)

### 2.7.4. LinuxCNC

Software libre de alta capacidad en control numérico para máquinas CNC como fresas, tornos, routers, cortadores de láser y plasma, inclusive para robots de hasta 9 ejes o grado de libertad. Presenta varios entornos gráficos que pueden ser personalizados para determinada aplicación. Lectura de códigos G sin la opción de poder generarla.

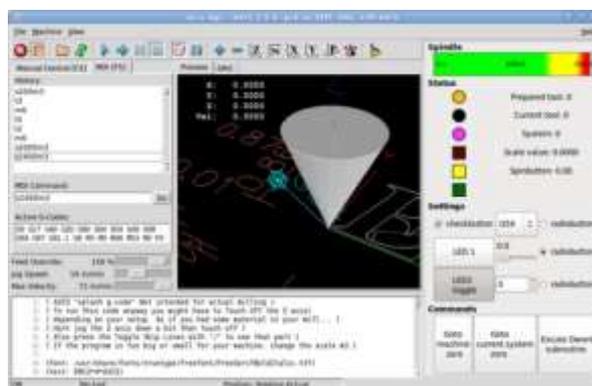


Figura 22.- Panel de control virtual LinuxCNC.

Fuente: (LinuxCNC, 2016)

## **2.8. Normas de Seguridad**

### **2.8.1. Seguridad en Máquinas**

La seguridad debe estar presente en todas las etapas de ciclo de vida de la máquina, partiendo desde la fase de diseño y fabricación, instalación, calibración, puesta en marcha, mantenimiento, hasta la culminación de su vida útil. Las leyes se establecen para que las máquinas sean seguras y evitar accidentes. La estructura que se maneja es por normas, que son especificaciones técnicas aprobadas por el organismo de normalización.

- Normas Tipo A: Normas básicas de seguridad, conceptos básicos, principios de diseño, aspectos generales.
- Normas Tipo B: Normas de seguridad genéricas, aspectos particulares de seguridad, dispositivos de seguridad.
- Normas Tipo C: Normas de seguridad para máquina, requisitos de seguridad específicos.

Algunos ejemplos de normas en máquinas herramienta industriales:

- EN ISO 12100-1. Tipo A. Seguridad de las máquinas – Conceptos básicos, principios generales para el diseño. Parte 1: Terminología básica, metodología.
- EN ISO 13849-1. Tipo B. Seguridad de maquinaria – Partes de los sistemas de mando relativos a la seguridad. Parte 1: Principios generales para el diseño.
- EN 693. Tipo C. Máquinas-herramienta – Prensas hidráulicas – Requisitos de seguridad. (Schneider Electric, 2011)

Para máquinas de automatización con control numérico:

- ISO 6983-1: 2009. Sistemas de automatización e integración – Control numérico de máquinas – Formato de programa y definición de las palabras de dirección – Parte 1: Formato de los datos para el posicionamiento, el movimiento de línea y sistemas de control de contorno. (ISO, 2017)

## CAPÍTULO III

### DISEÑO MECATRÓNICO

#### 3.1. Características del Diseño

Los parámetros de diseño de la máquina los impone SETRA, con los cuales se formará un pilar base para la generación de conceptos. Con esto se logra una descripción aproximada de la tecnología, principios de trabajo y forma general de la máquina.

El proceso de generación de conceptos empieza con un conjunto de necesidades del cliente y especificaciones objetivo, lo cual da como resultado un conjunto de conceptos del producto de los que el equipo hará una selección final. (Ulrich & Eppinger, 2013)

Una vez conocidas las necesidades, en la Tabla 1 se presentan las características principales que serán de fundamento para el desarrollo del proyecto.

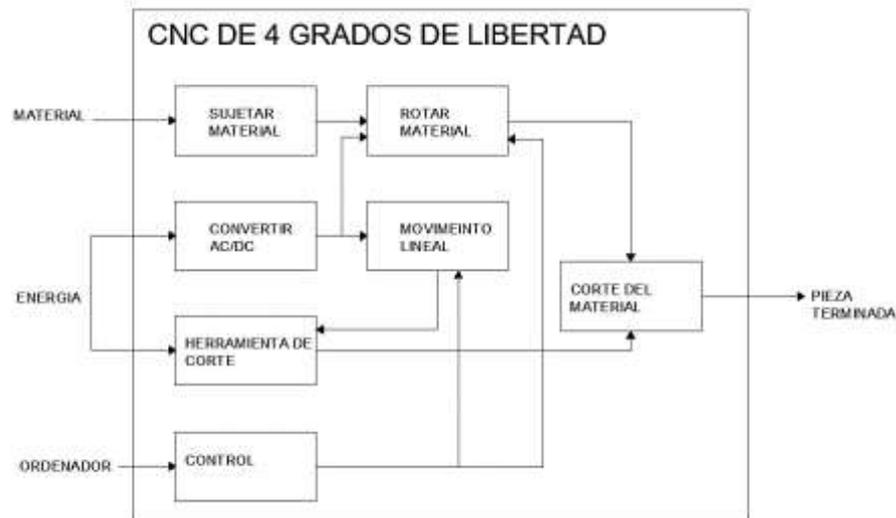
**Tabla 1.**

#### **Características previas al diseño.**

#	Característica	Descripción
1	Dimensiones	Volumen de trabajo de 800 x 500 x 150 [mm] en XYZ, figuras de 700mm de largo y 100mm de diámetro
2	Número de ejes	La máquina debe funcionar a manera de torno y fresa de modo que se puedan maquinar figuras tridimensionales. Deseable 4 ejes
3	Precisión	Preferentemente superior a los 0.05 mm
4	Herramienta	La herramienta debe ser desmontable de manera que se pueda usar manualmente según sea conveniente
5	Material a trabajar	La madera es el principal material de trabajo, con la opción de maquinar algunos metales blandos y realizar grabados en ellos
6	Estructura	Máquina desmontable para poder transportarla fácilmente
7	Presupuesto	3000 dólares

Fuente: (Características por SETRA)

Las especificaciones mostradas son las consideradas más importantes dadas por el cliente, a partir de éstas se llega a un concepto general a desarrollarse como una máquina de control numérico computarizado de 4 grados de libertad controlada por ordenador. La máquina supone un sistema muy grande para ser resuelto de manera que se lo divide en etapas funcionales que pueden ser resueltos independientemente.



**Figura 23.- Diagrama funcional de una CNC de 4 grados de libertad.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

Cada etapa será resuelta realizando una selección de entre varias alternativas de diseño, tomando en cuenta las especificaciones y características más relevantes de cada componente.

### **3.2. Alternativas de Diseño**

Las tablas a continuación presentan una ponderación de las características de cada alternativa de diseño facilitando la selección. Este método de selección por tablas se lo conoce como matrices de selección.

#### **3.2.1. Transmisión y Transformación de Movimiento**

Los sistemas que se presentan en la Tabla 2 realizan la conversión de movimiento rotatorio a lineal. Se necesita de precisión en el desplazamiento, que sea de fácil montaje, con un costo bajo y que el funcionamiento no presente desventajas en la operación de la máquina.

Tabla 2.

## Cuadro comparativo de los sistemas de transmisión.

Criterios de selección	Sistema		
	Husillo de bolas	Piñón cremallera	Tornillo de potencia
Montaje	Soportes fáciles de colocar en la posición requerida	Tiempo elevado en preparación de la zona de montaje	Fabricación de soportes, conlleva tiempo y dinero
Funcionamiento	Mínimo rozamiento entre bolas circulantes y husillo	Movimiento reversible, elementos fijo-móvil	Alto rozamiento entre tuerca y eje, desgaste y calentamiento
Precisión	Alta, 250 nm por cada centímetro	Error de paso individual de 0.008 mm	Error de paso de 300 $\mu$ m por cada 300 mm
Costo	Medio	Alto	Bajo

Fuente: (Propia)

Para establecer el valor de importancia para cada criterio de selección, se les asigna un valor porcentual y se los califica en una escala de 1 a 5, donde 1 es menos significativo y 5 muy significativo.

Tabla 3.

## Ponderación de los sistemas de transmisión.

	Husillo de Bolas		Piñón Cremallera		Tornillo de Potencia		
	%/1	Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total
Montaje	0,2	5	1	3	0,6	4	0,8
Funcionamiento	0,3	4	1,2	4	1,2	3	0,9
Precisión	0,3	5	1,5	5	1,5	3	0,9
Costo	0,2	3	0,6	2	0,4	4	0,8
	1		4,3		3,7		3,4

Se selecciona el sistema por husillos de bolas para la transmisión y transformación de movimiento ya que posee más características favorables en comparación con los otros sistemas.

### 3.2.2. Movimiento Lineal

Se desea una configuración estructural de cabeza móvil y mesa fija. La elección del mejor sistema será en base a la carga que puede soportar, montaje rápido, sencillo y que no produzca ruido. La Tabla 4 muestra las características de los sistemas.

**Tabla 4.**

**Cuadro comparativo de los sistemas de movimiento lineal.**

Criterios de selección	Sistema	
	Rodillos guía	Round rail
		
Facilidad de montaje	Realización de agujeros en la estructura a montar	Fácil de montar en posición horizontal o vertical
Funcionamiento	Silencioso, poco rozamiento, sin oscilaciones entre cuerpos deslizantes	Rodamiento de bolas circulantes, mayor apoyo hacia el riel, bajo ruido
Precisión	Movimientos precisos, gran estabilidad, capacidad de carga elevada	Antifricción, movimiento suave y preciso, la rigidez es mayor con precarga
Costo	Alto	Medio

Fuente: (Propia)

Tabla 5.

**Ponderación de los sistemas de movimiento lineal.**

	%/1	Rodillos guía		Round rail	
		Valor	Total	Valor	Total
Facilidad de montaje	0,3	4	1,2	5	1,5
Funcionamiento	0,2	5	1,0	4	0,8
Precisión	0,3	5	1,5	5	1,5
Costo	0,2	2	0,4	3	0,6
	1		4,1		4,4

El sistema que brinda las mejores prestaciones y con un costo relativamente bajo es la guía circular con rodamiento lineal, debido a ello se lo elige para el movimiento lineal de los ejes de la máquina.

**3.2.3. Motores**

El movimiento de los motores debe ser preciso para lograr un mecanizado complejo. Otras características importantes son el torque, el modo de trabajo y funcionamiento.

Tabla 6.

**Cuadro comparativo entre motores.**

	<b>Motor paso a paso</b>	<b>Servomotor</b>
<b>Criterios de selección</b>		
Facilidad de uso	Conexión a un controlador externo. Movimiento de un paso a la vez por cada pulso aplicado, paso más pequeño de 1.8°	Requiere de un controlador sofisticado, diseñado específicamente para trabajar con servomotores

CONTINÚA ⇨

Funcionamiento	Giro del rotor mediante bobinas excitadoras ubicadas en el estator	Activación mediante modulación de ancho de pulso, sensor acoplado para la retroalimentación de posición
Precisión	Elevado grado de exactitud en el posicionamiento y regulación de velocidad	Gran precisión de posicionado, repetitividad del movimiento y elevada respuesta dinámica
Torque	Alto torque desde el arranque, hasta 200 kgf-cm	Alta estabilidad de par, hasta 70 Nm en potencias pequeñas
Costo	Medio	Alto

Fuente: (Propia)

**Tabla 7.**

**Ponderación de los tipos de motores.**

	%1	Motor paso a paso		Servomotor	
		Valor	Total	Valor	Total
Facilidad de uso	0,1	5	0,5	3	0,3
Funcionamiento	0,1	4	0,4	4	0,4
Precisión	0,2	5	1	4	0,8
Torque	0,3	4	1,2	4	1,2
Costo	0,3	3	0,9	2	0,6
	1		4,0		3,3

Las características de ambos elementos son muy similares, las ventajas de los motores paso a paso es que su costo es asequible en este proyecto y mucho más fáciles de controlar, junto a las otras características son la opción correcta a elegir.

### 3.2.4. Dispositivo de control

Existen controladores de gran capacidad para máquinas herramientas, pero muy costosas. Lo establecido es utilizar un dispositivo de bajo costo, con suficientes pines de entrada y salida para la conexión de los componentes de la máquina.

**Tabla 8.**

**Cuadro comparativo de los dispositivos de control.**

	DB25 Breakout board	USB CNC motion controller
<b>Criterios de selección</b>		
Pines	12 pines de salida: control de motores y herramienta, 5 pines de entrada: fin de carrera, pulsadores, 5, 12, 24 VDC	16 pines de salida: conexión de motores, sentido de giro de la herramienta, 14 pines de entrada: interruptores límites, botones de paro y seteo
Funcionamiento	Por puerto paralelo	Puerto USB
Conexiones	Hasta 6 ejes	Hasta 4 ejes
Costo	Bajo	Medio

Fuente: (Propia)

**Tabla 9.**

**Ponderación de los dispositivos de control.**

	DB25 breakout board			USB CNC motion controller	
	%/1	Valor	Total	Valor	Total
Pines	0,3	4	1,2	5	1,5
Funcionamiento	0,1	4	0,4	5	0,5
Conexiones	0,3	5	1,5	4	1,2
Costo	0,3	4	1,2	3	0,9
	1		4,3		4,1

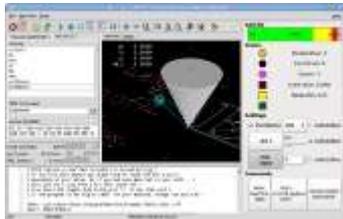
El puerto paralelo es una tecnología obsoleta que se lo encuentra en las pasadas generaciones de computadoras. El dispositivo DB25 breakout board tiene la opción de poder conectar más ejes, lo que deja una puerta abierta a la mejora sustancial de la máquina. Con los pines necesarios para el correcto funcionamiento de la máquina es elegido como controlador.

### 3.2.5. Software de control

Las señales que recibe el dispositivo de control son enviadas mediante el paquete informático que procesa la lectura del código G, esto hace posible el movimiento controlado de los motores. Se seleccionará un programa intuitivo, de fácil manejo, amigable en entorno gráfico y que presente mayor flexibilidad en sus funciones.

**Tabla 10.**

**Cuadro comparativo del software de control.**

	<b>Mach3</b>	<b>LinuxCNC</b>
<b>Criterios de selección</b>		
<b>Funciones</b>	Control numérico de hasta 6 ejes, generación de código G a través de plugins del software, interfaz personalizable, control de la velocidad de la herramienta	Se ejecuta en Linux, diferentes interfaces gráficas, lectura de código G sin la opción de generarla
<b>Aplicaciones</b>	Tornos, fresadoras, routers, láser, plasma, máquinas de grabado	Fresadoras, tornos, impresoras 3D, cortadores láser y plasma, brazos robóticos, hexápodos
<b>Costo</b>	Medio	Software libre

Fuente: (Propia)

Tabla 11.

## Ponderación del software de control.

	Mach3			LinuxCNC	
	%/1	Valor	Total	Valor	Total
Funciones	0,5	5	2,5	3	1,5
Aplicaciones	0,3	4	1,2	5	1,5
Costo	0,2	3	0,6	5	1,0
	1		4,3		4,0

Mach 3 se ejecuta en Windows que es un sistema operativo muy usado entre las personas, convierte una computadora de escritorio en un verdadero controlador de máquinas CNC. Además, ofrece varias características avanzadas y la opción de manejar numerosos tipos de máquinas. Por todas estas razones se selecciona este software.

Los elementos seleccionados que formarán parte del proyecto se presentan en la siguiente figura.

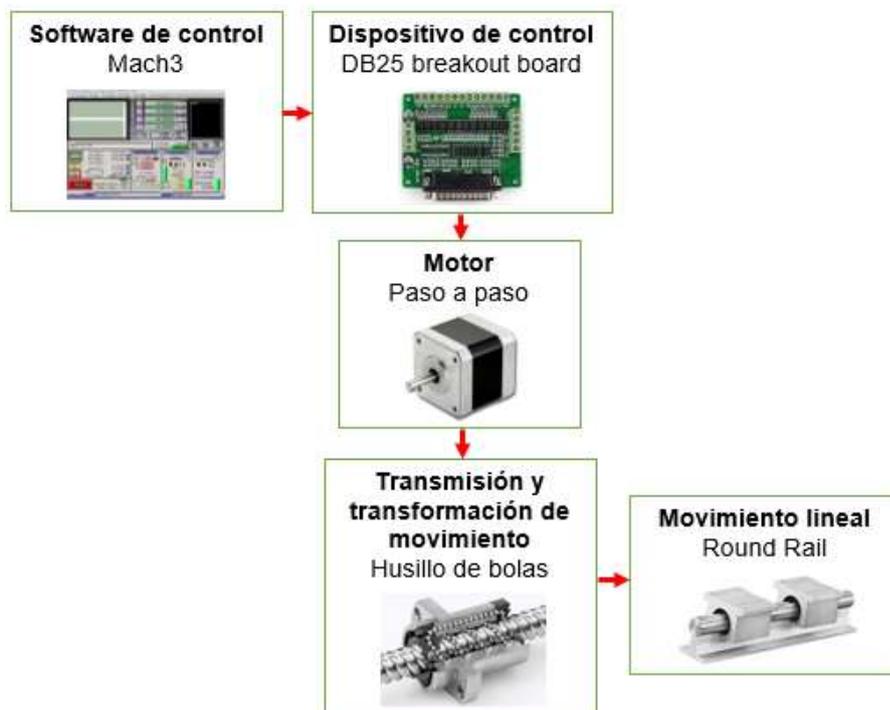


Figura 24.- Elementos y dispositivos seleccionados.

Fuente: (Elaboración propia)

### 3.3. Diseño del Sistema Mecánico

Para hallar los componentes que conforman la máquina, lo más importante que hay que calcular es la Fuerza de Corte ( $F_c$ ) en el fresado y la Fuerza de Avance ( $F_f$ ) en el taladrado. Con estos dos parámetros se hallan las cargas aplicadas en los ejes, facilitando la determinación de los diámetros de las guías lineales y husillos de bolas, como también los torques de los motores paso a paso a emplear.

El proceso que se seguirá para encontrar los parámetros antes mencionados, será ir analizando el comportamiento de cada eje empezando por el Z, donde se encuentra la herramienta rebajadora (tupi).

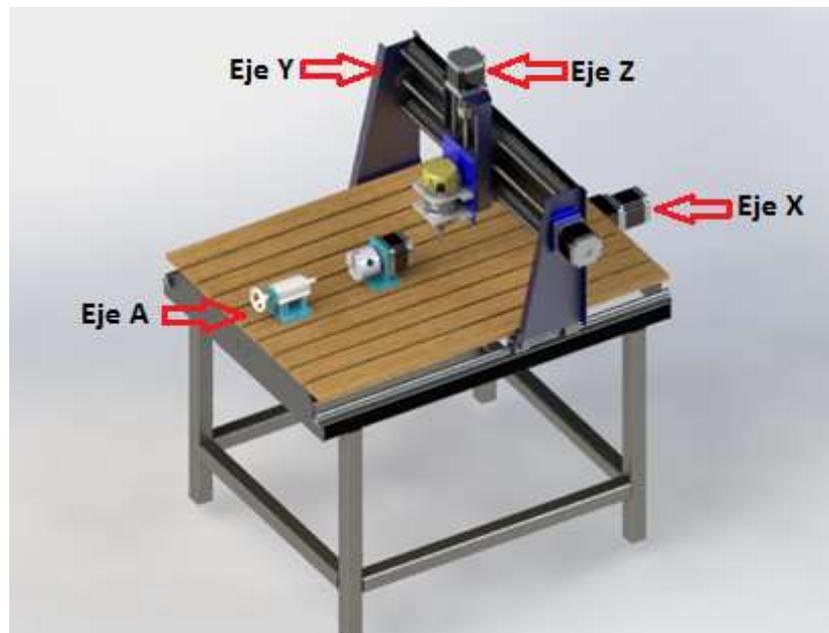


Figura 25.- Representación general de la máquina CNC.

Fuente: (Elaboración propia)

#### 3.3.1. Dimensionamiento Estructural

La máquina está enfocada en el maquinado de madera, sin embargo, se pretende implementar el sistema de manera que sea capaz de realizar el desbaste en materiales metálicos suaves. Se toma como referencia los parámetros más exigentes posibles en el maquinado de aluminio con lo que se logra dar mayor robustez y estabilidad a la estructura de la máquina.

### 3.3.2. Fórmulas y Cálculos para Fresado

Las fórmulas que se detallan, fueron tomadas del Libro de Formación de (SANDVIK, Tecnología del Corte del Metal, 2016) y del Catálogo de Información General de (Dormer, 2012).

#### 3.3.2.1. Velocidad del husillo

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D_c} \quad (3.1)$$

En donde:

- $n$  [rpm]: Velocidad del husillo.
- $V_c$  [m/min]: Velocidad de corte.
- $D_c$  [mm]: Diámetro de la fresa.

#### 3.3.2.2. Avance de mesa

$$V_f = f_z \times z_c \times n \quad (3.2)$$

En donde:

- $V_f$  [mm/min]: Avance de mesa.
- $f_z$  [mm]: Avance por diente.
- $z_c$ : Número de dientes de la fresa.
- $n$  [rpm]: Velocidad del husillo.

#### 3.3.2.3. Profundidad de corte radial

$$a_e = \frac{3}{4} \times D_c \quad (3.3)$$

En donde:

- $a_e$  [mm]: Profundidad de corte radial.
- $D_c$  [mm]: Diámetro de la fresa.

#### 3.3.2.4. Espesor medio de la viruta

$$h_m = \frac{360 \times \sin(K_r) \times a_e \times f_z}{\pi \times D_c \times \arccos\left(1 - \frac{2 \times a_e}{D_c}\right)} \quad (3.4)$$

En donde:

- $h_m$  [mm]: Espesor medio de la viruta.
- $K_r$  [°]: Ángulo de posición.
- $a_e$  [mm]: Profundidad de corte radial.
- $f_z$  [mm]: Avance por diente.
- $D_c$  [mm]: Diámetro de la fresa.

### 3.3.2.5. Fuerza de corte específica

$$k_c = k_{c1} \times h_m^{-mc} \times \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right) \quad (3.5)$$

En donde:

- $k_c$  [N/mm<sup>2</sup>]: Fuerza de corte específica.
- $k_{c1}$  [N/mm<sup>2</sup>]: Fuerza de corte específica para un espesor medio de la viruta de 1mm.
- $h_m$  [mm]: Espesor medio de la viruta.
- $mc$ : Factor de compensación del grosor de la viruta.
- $\gamma_0$  [°]: Ángulo de desprendimiento de la plaquita.

### 3.3.2.6. Potencia neta

$$P_c = \frac{a_p \times a_e \times V_f \times k_c}{60 \times 10^6} \quad (3.6)$$

En donde:

- $P_c$  [kW]: Potencia neta.
- $a_p$  [mm]: Profundidad de corte axial.
- $a_e$  [mm]: Profundidad de corte radial.
- $V_f$  [mm/min]: Avance de mesa.
- $k_c$  [N/mm<sup>2</sup>]: Fuerza de corte específica.

### 3.3.2.7. Par de apriete

$$M_c = \frac{P_c \times 30 \times 10^3}{\pi \times n} \quad (3.7)$$

En donde:

- $M_c$  [Nm]: Par de apriete.
- $P_c$  [kW]: Potencia neta.

- $n$  [rpm]: Velocidad del husillo.

### 3.3.2.8. Área de corte

$$A_c = a_p \times h_m \quad (3.8)$$

En donde:

- $A_c$  [mm<sup>2</sup>]: Área de corte.
- $a_p$  [mm]: Profundidad de corte axial.
- $h_m$  [mm]: Espesor medio de la viruta.

### 3.3.2.9. Fuerza de corte

$$F_c = k_c \times A_c \quad (3.9)$$

En donde:

- $F_c$  [N]: Fuerza de corte.
- $k_c$  [N/mm<sup>2</sup>]: Fuerza de corte específica.
- $A_c$  [mm<sup>2</sup>]: Área de corte.

La Tabla 12 contiene los datos para el proceso de fresado que se pueden verificar en los ANEXOS 1 y 2.

**Tabla 12.**

#### **Parámetros de corte del fresado.**

<b>Parámetros</b>	<b>Datos</b>	<b>Unidades</b>
Velocidad de corte ( $V_c$ )	300	m/min
Diámetro de la fresa ( $D_c$ )	12.7	mm
Avance por diente ( $f_z$ )	0.28	mm
Número de dientes de la fresa ( $z_c$ )	3	-
Ángulo de posición ( $K_r$ )	90	°
Fuerza de corte específica para un espesor medio de la viruta de 1mm ( $k_{c1}$ )	450	N/mm <sup>2</sup>
Factor de compensación del grosor de la viruta ( $mc$ )	0.18	-
Ángulo de desprendimiento de la plaquita ( $\gamma_0$ )	0	°
Profundidad de corte axial ( $a_p$ )	2	mm

Aplicando los datos de corte en las fórmulas 3.1 a 3.9, se obtiene los resultados de la Tabla 13.

**Tabla 13.**

**Parámetros resultantes del fresado.**

Parámetros	Resultados	Unidades
Velocidad del husillo ( $n$ )	7519	rpm
Avance de mesa ( $V_f$ )	6316	mm/min
Profundidad de corte radial ( $a_e$ )	9.53	mm
Espesor medio de la viruta ( $h_m$ )	0.20	mm
Fuerza de corte específica ( $k_c$ )	600.92	N/mm <sup>2</sup>
Potencia neta ( $P_c$ )	1.21	kW
Par de apriete ( $M_c$ )	1.53	Nm
Área de corte ( $A_c$ )	0.40	mm <sup>2</sup>
Fuerza de corte ( $F_c$ )	240.37	N

### 3.3.3. Fórmulas y Cálculos para Taladrado

#### 3.3.3.1. Velocidad del husillo

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D_c} \quad (3.10)$$

En donde:

- $n$  [rpm]: Velocidad del husillo.
- $V_c$  [m/min]: Velocidad de corte.
- $D_c$  [mm]: Diámetro de la broca.

#### 3.3.3.2. Avance por diente

$$f_z = \frac{f_n}{z_c} \quad (3.11)$$

En donde:

- $f_z$  [mm]: Avance por diente.
- $f_n$  [mm/rev]: Avance por revolución.
- $z_c$ : Número de dientes.

### 3.3.3.3. Fuerza de corte específica

$$k_c = k_{c1} \times [f_z \times \sin(K_r)]^{-mc} \times \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right) \quad (3.12)$$

En donde:

- $k_c$  [ $N/mm^2$ ]: Fuerza de corte específica.
- $k_{c1}$  [ $N/mm^2$ ]: Fuerza de corte específica para un espesor medio de la viruta de 1mm.
- $f_z$  [ $mm$ ]: Avance por diente.
- $K_r$  [ $^\circ$ ]: Ángulo de posición.
- $mc$ : Factor de compensación del grosor de la viruta.
- $\gamma_0$  [ $^\circ$ ]: Ángulo de desprendimiento de la plaquita.

### 3.3.3.4. Consumo de potencia

$$P_c = \frac{f_n \times V_c \times D_c \times k_c}{240 \times 10^3} \quad (3.13)$$

En donde:

- $P_c$  [ $kW$ ]: Consumo de potencia.
- $f_n$  [ $mm/rev$ ]: Avance por revolución.
- $V_c$  [ $m/min$ ]: Velocidad de corte.
- $D_c$  [ $mm$ ]: Diámetro de la broca.
- $k_c$  [ $N/mm^2$ ]: Fuerza de corte específica.

### 3.3.3.5. Fuerza de avance

$$F_f = 0.5 \times k_c \times \frac{D_c}{2} \times f_n \times \sin(K_r) \quad (3.14)$$

En donde:

- $F_f$  [ $N$ ]: Fuerza de avance.
- $k_c$  [ $N/mm^2$ ]: Fuerza de corte específica.
- $D_c$  [ $mm$ ]: Diámetro de la broca.
- $f_n$  [ $mm/rev$ ]: Avance por revolución.
- $K_r$  [ $^\circ$ ]: Ángulo de posición.

### 3.3.3.6. Par de apriete

$$M_c = \frac{P_c \times 30 \times 10^3}{\pi \times n} \quad (3.15)$$

En donde:

- $M_c$  [Nm]: Par de apriete.
- $P_c$  [kW]: Consumo de potencia.
- $n$  [rpm]: Velocidad del husillo.

La Tabla 14 contiene los datos para el proceso de taladrado que se pueden verificar en los ANEXO 2 y 3.

**Tabla 14.**

#### Parámetros de corte del taladrado.

Parámetros	Datos	Unidades
Velocidad de corte ( $V_c$ )	160	m/min
Diámetro de la broca ( $D_c$ )	12.7	mm
Avance por revolución ( $f_n$ )	0.25	mm/rev
Número de dientes ( $z_c$ )	3	-
Fuerza de corte específica para un espesor medio de la viruta de 1mm ( $k_{c1}$ )	450	N/mm <sup>2</sup>
Ángulo de posición ( $K_r$ )	90	°
Factor de compensación del grosor de la viruta ( $m_c$ )	0.18	-
Ángulo de desprendimiento de la plaquita ( $\gamma_0$ )	0	°

Aplicando los datos de corte en las fórmulas 3.10 a 3.15, se obtiene los resultados de la Tabla 15.

Tabla 15.

**Parámetros resultantes del taladrado.**

Parámetros	Resultados	Unidades
Velocidad del husillo ( $n$ )	4010	rpm
Avance por diente ( $f_z$ )	0.08	mm
Fuerza de corte específica ( $k_c$ )	703.83	N/mm <sup>2</sup>
Consumo de potencia ( $P_c$ )	1.49	kW
Fuerza de avance ( $F_f$ )	558.66	N
Par de apriete ( $M_c$ )	3.55	Nm

De las Tablas 13 y 15 se compara las velocidades del husillo y potencias que se necesita al momento del maquinado, los parámetros de mayor valor son de referencia para elegir una herramienta que cubra con tales exigencias. En la Figura 26 se presentan las especificaciones de dos rebajadoras Dewalt existentes en el mercado.

ESPECIFICACIONES	DW616	DW618D
Amperios	11.0	12.0
Caballos de potencia	1-3/4 HP	2-1/4 HP
Velocidad sin carga	24,500 rpm	8,000 - 24,000 rpm
Diámetro del collet	1/2" - 1/4"	1/2" - 1/4"
Recorrido vertical	No	No
Regulador de profundidad	Anillo micro fino	Anillo micro fino
Dimensión de la base	6"	6"
Traba de eje	No	Sí

Figura 26.- Especificaciones de herramientas tupi Dewalt.

Fuente: (Dewalt, 2015)

Se selecciona la DW618D por tener un rango de velocidad de 8000 a 24000 rpm, por la potencia de 2-1/4 HP (1.67 kW) y por brindar un arranque suave al comienzo de los trabajos de maquinado.

**3.3.4. Análisis de Guías Lineales en Eje Z****3.3.4.1. Diagrama de Cuerpo Libre**

La Figura 27 presenta el diagrama de cuerpo libre (DCL) para el eje Z, donde se puede ver las fuerzas que intervienen en el conjunto.

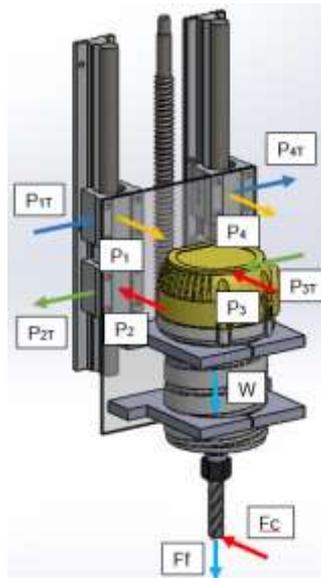


Figura 27.- Diagrama de fuerzas en el eje Z.

Fuente: (Elaboración propia)

### 3.3.4.2. Cálculo de Fuerzas de Carga para Taladrado

Para establecer las cargas ( $P_1$  a  $P_4$ ) que se producen en las guías lineales por el movimiento vertical de la herramienta tupi y por el desplazamiento en el área de trabajo, se toma en cuenta la fuerza de avance ( $F_f$ ) con el peso del tupi que se va aplicar con respecto al sistema de guías lineales, así también las distancias ( $l_0$  a  $l_3$ ) a las que se encuentran los rodamientos lineales y la carga total ( $W$ ).

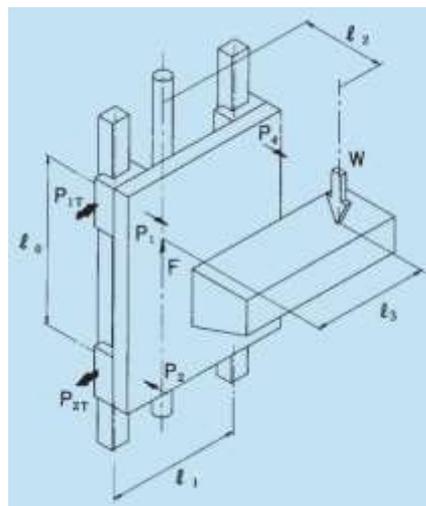


Figura 28.- Eje vertical, movimiento a velocidad constante o reposo.

Fuente: (THK, 2009)

La configuración de la Figura 28 establece las siguientes fórmulas para el cálculo de las cargas.

$$P_1 = P_4 = \frac{W}{2} x \frac{l_2}{l_0} \quad (3.16)$$

$$P_2 = P_3 = -\frac{W}{2} x \frac{l_2}{l_0} \quad (3.17)$$

$$P_{1T} = P_{4T} = \frac{W}{2} x \frac{l_3}{l_0} \quad (3.18)$$

$$P_{2T} = P_{3T} = -\frac{W}{2} x \frac{l_3}{l_0} \quad (3.19)$$

Los datos necesarios se encuentran en la Tabla 16. Las distancias se las establece mediante el diseño asistido por computador.

**Tabla 16.**

**Distancias y fuerzas para el eje vertical.**

Parámetros	Datos	Unidades
Fuerza de avance ( $F_f$ )	558.66	N
Peso tupi ( $W_1$ )	25	N
$l_0$	65	mm
$l_1$	116	mm
$l_2$	78	mm
$l_3$	0	mm
$W (F_f + W_1)$	583.66	N

Al ser reemplazados en las fórmulas 3.16 a 3.19, se obtiene:

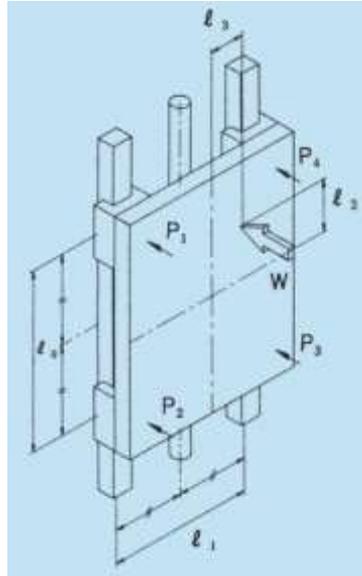
**Tabla 17.**

**Cargas resultantes en el taladrado.**

Parámetros	Resultados	Unidades
$P_1, P_4$	350.2	N
$P_2, P_3$	-350.2	N

### 3.3.4.3. Cálculo de Fuerzas de Carga para Fresado

En este caso la fuerza de corte ( $F_c$ ) interviene en el cálculo, de forma normal al conjunto de guías.



**Figura 29.- Eje vertical con carga normal.**

**Fuente: (THK, 2009)**

La configuración de la Figura 29 establece las siguientes fórmulas para el cálculo de las cargas.

$$P_1 = \frac{W}{4} + \frac{W}{2} \left( \frac{l_2}{l_0} - \frac{l_3}{l_1} \right) \quad (3.20)$$

$$P_2 = \frac{W}{4} - \frac{W}{2} \left( \frac{l_2}{l_0} + \frac{l_3}{l_1} \right) \quad (3.21)$$

$$P_3 = \frac{W}{4} - \frac{W}{2} \left( \frac{l_2}{l_0} - \frac{l_3}{l_1} \right) \quad (3.22)$$

$$P_4 = \frac{W}{4} + \frac{W}{2} \left( \frac{l_2}{l_0} + \frac{l_3}{l_1} \right) \quad (3.23)$$

Los datos necesarios se encuentran en la Tabla 18.

**Tabla 18.****Distancias y fuerza normal para el eje vertical.**

<b>Parámetros</b>	<b>Datos</b>	<b>Unidades</b>
Fuerza de corte ( $F_c$ )	240.37	N
$l_0$	65	mm
$l_1$	116	mm
$l_2$	255	mm
$l_3$	0	mm

Al ser reemplazados en las fórmulas 3.20 a 3.23, se obtiene:

**Tabla 19.****Cargas resultantes en el fresado.**

<b>Parámetros</b>	<b>Resultados</b>	<b>Unidades</b>
$P_1, P_4$	531.59	N
$P_2, P_3$	-411.40	N

Se debe sumar los valores de las Tablas 17 y 19, ya que el eje Z se encarga del maquinado de la pieza ejecutando el fresado como también el taladrado. Los valores totales de las cargas se presentan en la Tabla 20.

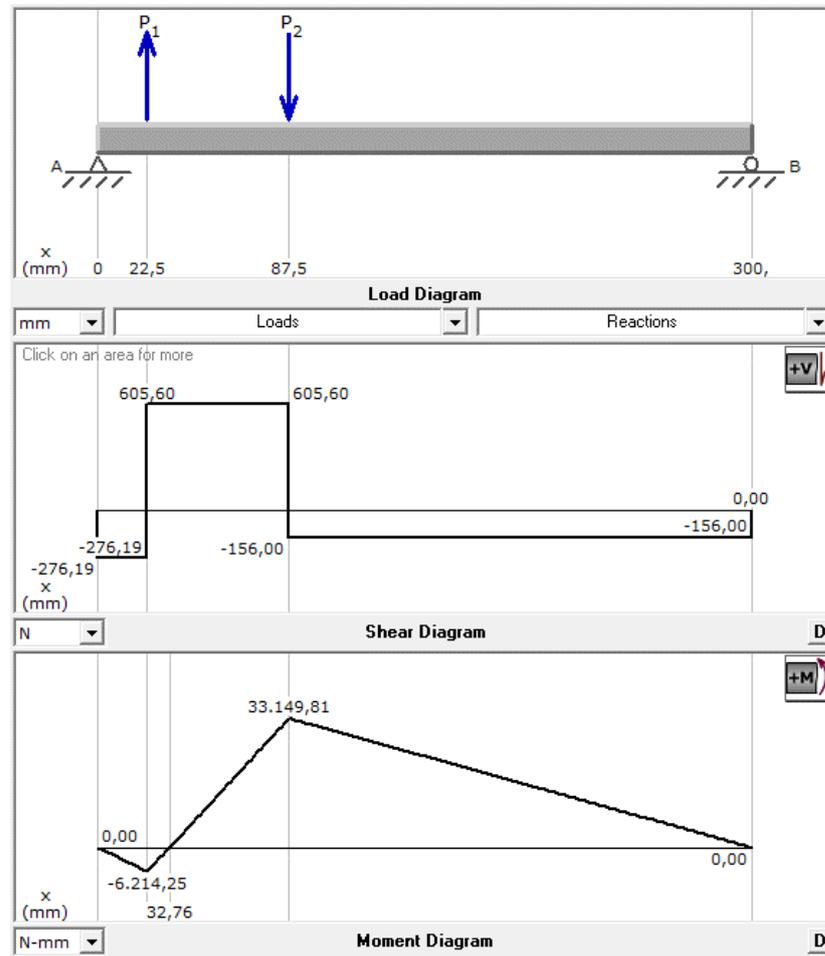
**Tabla 20.****Cargas resultantes presentes en el eje Z.**

<b>Parámetros</b>	<b>Valor Total</b>	<b>Unidades</b>
$P_1, P_4$	881.79	N
$P_2, P_3$	-761.6	N

**3.3.4.4. Determinación de Esfuerzos**

Mediante software de análisis estructural, se procede con la determinación de las reacciones, fuerzas cortantes y del momento flector de las guías, siendo la posición más alta del carro vertical el punto crítico a analizar. La guía cuenta

con una longitud de 300 mm de largo y las cargas P1 y P2 se sitúan a 22,5 mm y 87,5 mm respectivamente.



**Figura 30.- Diagramas de corte y momento flector para guía lineal del eje Z.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

Los valores resultantes del cálculo estructural simple se encuentran en la Tabla 21 para cálculos posteriores.

**Tabla 21.**

**Reacciones y momento flector en guía lineal del eje Z.**

Parámetros	Resultados	Unidades
Reacción $R_{AZ}$	276.19	N
Reacción $R_{BZ}$	156	N
Momento Flector ( $M_{fZ}$ )	33149.81	N.mm

### 3.3.4.5. Diámetro de Guías Lineales

Para que no se produzca deformación en las guías y permanezca dentro del rango linealmente elástico se obtiene el esfuerzo máximo, su fórmula es:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_y}{n_1} \quad (3.24)$$

En donde:

- $\sigma_{m\acute{a}x}$  [ $N/mm^2$ ]: Esfuerzo máximo.
- $\sigma_y$  [ $N/mm^2$ ]: Esfuerzo de fluencia para acero 1018.  $370 N/mm^2$
- $n_1$ : Factor de seguridad. (1.5 – 2.5) Asumiendo 1.5

Utilizando la fórmula 3.24, el esfuerzo es:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 246.67 N/mm^2$$

El esfuerzo máximo descrito se produce en la sección de momento flexionante máximo, intervienen en este caso el momento flector y el módulo de resistencia de la sección.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_f}{S} \quad (3.25)$$

En donde:

- $\sigma_{m\acute{a}x}$  [ $N/mm^2$ ]: Esfuerzo máximo.
- $M_f$  [ $N \cdot mm$ ]: Momento flector.
- $S$  [ $mm^3$ ]: Módulo de resistencia de la sección.

Despejando el módulo de resistencia y reemplazando los valores de  $\sigma_{m\acute{a}x}$  y  $M_{fz}$  en la fórmula 3.25 se tiene que:

$$S = 134.4 mm^3$$

Finalmente se tiene la fórmula del módulo de resistencia para una sección circular transversal maciza.

$$S = \frac{\pi \times d^3}{32} \quad (3.26)$$

En donde:

- $S$  [ $mm^3$ ]: Módulo de resistencia de la sección.

- $d$  [mm]: Diámetro de la guía lineal.

Despejando el diámetro y operando, se obtiene:

$$d_z = 11.10 \text{ mm}$$

### 3.3.5. Análisis de Guías Lineales en Eje Y

#### 3.3.5.1. Diagrama de cuerpo libre

La Figura 31 presenta el diagrama de cuerpo libre (DCL) para el eje Y, donde se puede ver las fuerzas que intervienen en el conjunto.

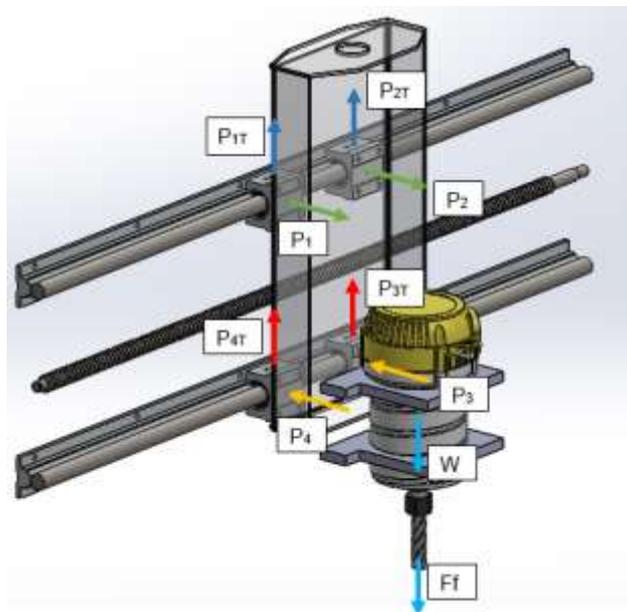
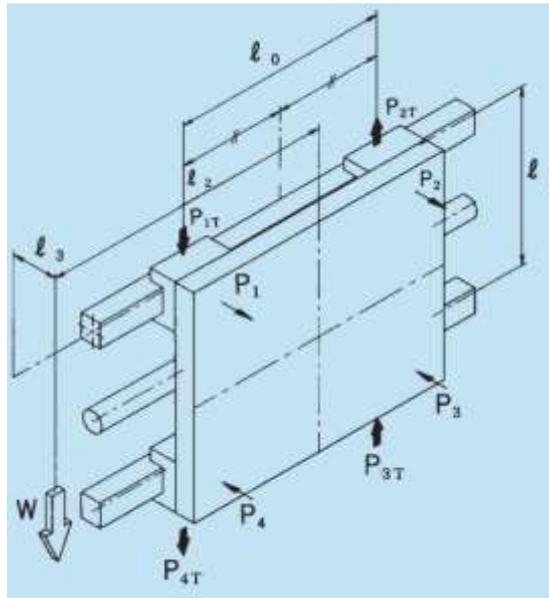


Figura 31.- Diagrama de fuerzas en el eje Y.

Fuente: (Elaboración propia)

#### 3.3.5.2. Cálculo de Fuerzas de Carga

En este caso se hacen presentes cargas verticales pasando por el centro del eje sin producir torque. Para establecer las cargas que se producen en las guías lineales se concentrará todo el peso de los componentes del eje Z en la misma ubicación de la fuerza de avance ( $F_f$ ).



**Figura 32.- Montaje en la pared, movimiento a velocidad constante o reposo.**

**Fuente: (THK, 2009)**

La configuración de la Figura 32 establece las siguientes fórmulas para el cálculo de las cargas.

$$P_1 = P_2 = \frac{W}{2} x \frac{l_3}{l_1} \quad (3.27)$$

$$P_3 = P_4 = -\frac{W}{2} x \frac{l_3}{l_1} \quad (3.28)$$

$$P_{1T} = P_{4T} = \frac{W}{4} + \left( \frac{W}{2} x \frac{l_2}{l_0} \right) \quad (3.29)$$

$$P_{2T} = P_{3T} = \frac{W}{4} - \left( \frac{W}{2} x \frac{l_2}{l_0} \right) \quad (3.30)$$

Los datos necesarios se encuentran en la Tabla 22. Las distancias se las establece mediante el diseño asistido por computador.

**Tabla 22.****Distancias y fuerzas para el montaje en la pared.**

Parámetros	Datos	Unidades
Fuerza de avance ( $F_f$ )	558.66	N
Peso conjunto eje Z ( $W_1$ )	120	N
$l_0$	116	mm
$l_1$	186	mm
$l_2$	0	mm
$l_3$	126	mm
$W (F_f + W_1)$	678.66	N

Al ser reemplazados en las fórmulas 3.27 a 3.30, se obtiene:

**Tabla 23.****Cargas resultantes en el montaje en la pared.**

Parámetros	Resultados	Unidades
$P_1, P_2$	229.87	N
$P_3, P_4$	-229.87	N
$P_{1T}, P_{4T}$	169.67	N
$P_{2T}, P_{3T}$	169.67	N

En cada punto de carga actúan 2 fuerzas perpendiculares entre sí, pasando por el centro del eje de la guía, simplemente se toma la fuerza resultante entre las dos utilizando el teorema de Pitágoras. El ejemplo de cálculo se lo realizará para  $P_4$  y  $P_{4T}$  ya que los demás puntos de carga tienen los mismos valores.

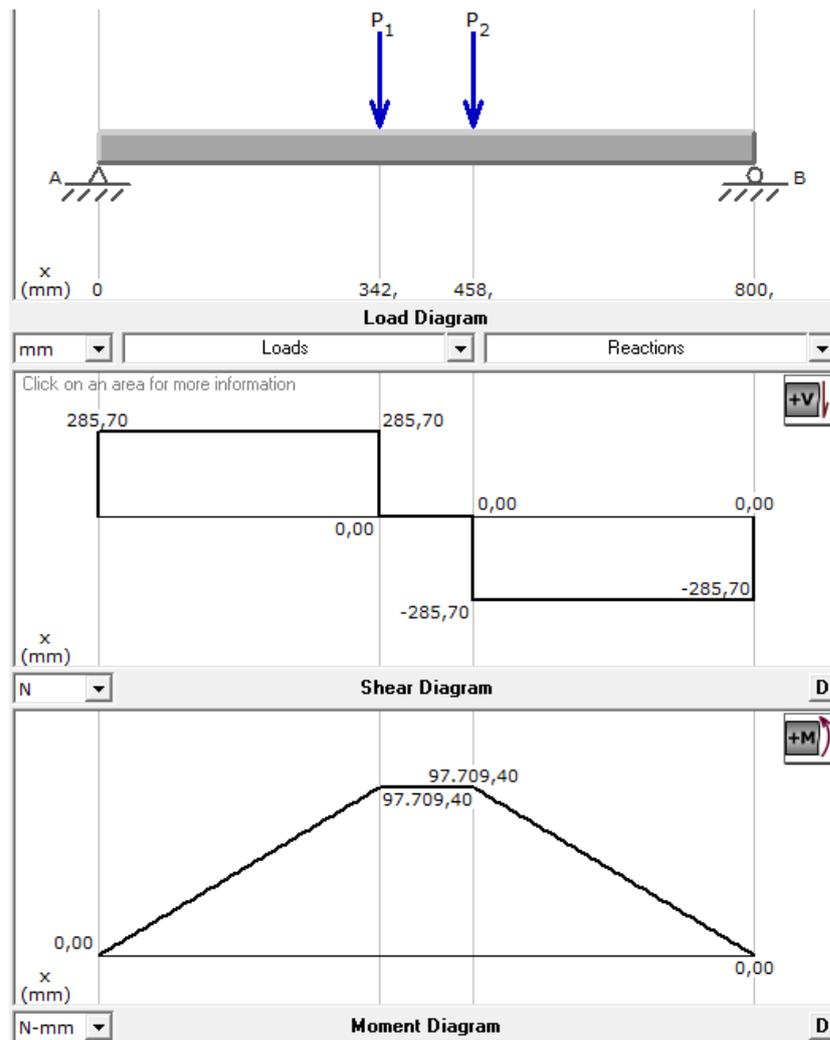
$$P_T^2 = P_4^2 + P_{4T}^2 \quad (3.31)$$

Reemplazando los valores resultantes de la Tabla 23 en 3.31 se tiene:

$$P_T = 285.7 \text{ N}$$

### 3.3.5.3. Determinación de Esfuerzos

Mediante software de análisis estructural, se procede con la determinación de las reacciones, fuerzas cortantes y del momento flector de las guías, el punto crítico a analizar será cuando el carro del eje Z se ubique a la mitad del recorrido. La guía cuenta con una longitud de 800 mm de largo y las cargas  $P_T$  se sitúan a 342 mm y 458 mm.



**Figura 33.- Diagramas de corte y momento flector para guía lineal del eje Y.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

Los valores resultantes del cálculo estructural simple se encuentran en la Tabla 24 para cálculos posteriores.

**Tabla 24.****Reacciones y momento flector en guía lineal del eje Y.**

Parámetros	Resultados	Unidades
Reacción $R_{AY}$	285.7	N
Reacción $R_{BY}$	285.7	N
Momento Flector ( $M_{fY}$ )	97709.40	N.mm

**3.3.5.4. Diámetro de Guías Lineales**

Se toma el valor del esfuerzo máximo ya calculado por ser el mismo material, aplicándola en la fórmula 3.25 junto al momento flector  $M_{fY}$  encontrado, el módulo de resistencia es:

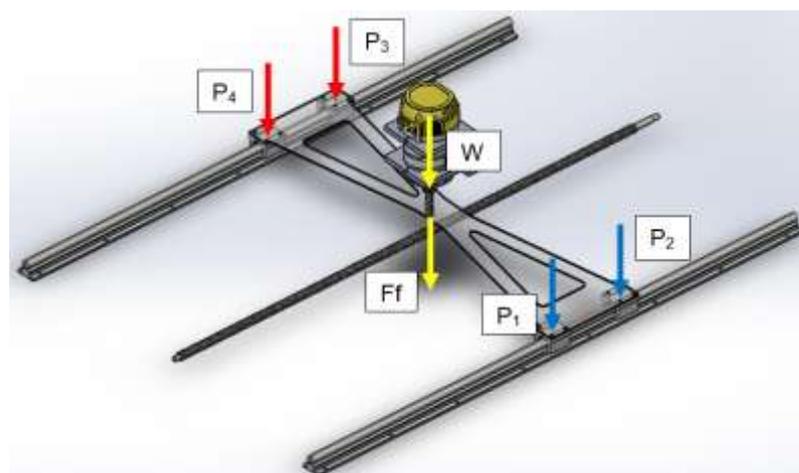
$$S = 396.12 \text{ mm}^3$$

El diámetro del eje de la guía lineal se calcula mediante la fórmula 3.26 y se tiene que:

$$d_Y = 15.92 \text{ mm}$$

**3.3.6. Análisis de Guías Lineales en Eje X****3.3.6.1. Diagrama de cuerpo libre**

La Figura 34 presenta el diagrama de cuerpo libre (DCL) para el eje X, donde se puede ver las fuerzas que intervienen en el conjunto.

**Figura 34.- Diagrama de fuerzas en el eje X.****Fuente: (Elaboración propia)**

### 3.3.6.2. Cálculo de Fuerzas de Carga

Para establecer las cargas que se producen en las guías lineales se concentrará todo el peso de los componentes del eje Z y eje Y en la misma ubicación de la fuerza de avance ( $F_f$ ).

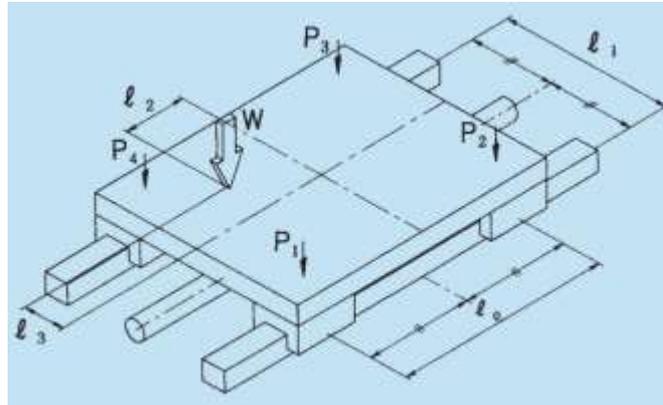


Figura 35.- Eje horizontal, movimiento a velocidad constante o reposo.

Fuente: (THK, 2009)

Se hace referencia a las fórmulas 3.20 a 3.23 con los datos de la Tabla 25.

Tabla 25.

#### Distancias y fuerzas para el eje horizontal.

Parámetros	Datos	Unidades
Fuerza de avance ( $F_f$ )	558.66	N
Peso conjunto eje Z y eje Y ( $W_1$ )	270	N
$l_0$	255	mm
$l_1$	755	mm
$l_2$	86	mm
$l_3$	0	mm
$W (F_f + W_1)$	828.66	N

Una vez realizado los cálculos, los valores resultantes se localizan en la Tabla 26.

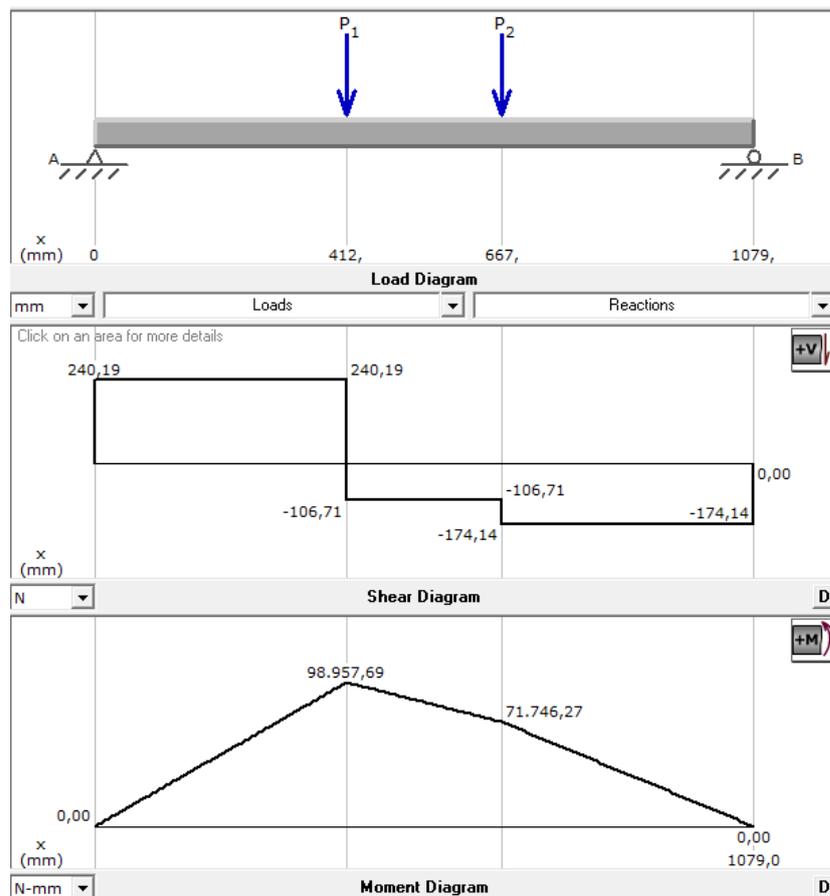
Tabla 26.

**Cargas resultantes en el eje horizontal.**

Parámetros	Resultados	Unidades
$P_1, P_4$	346.9	N
$P_2, P_3$	67.43	N

**3.3.6.3. Determinación de Esfuerzos**

Se utiliza el mismo procedimiento con el software de análisis estructural para hallar las reacciones, fuerzas cortantes y momento flector de las guías, el punto de interés para ser analizado será cuando el conjunto entre el eje Y Z se posicionen en la mitad del recorrido. La guía cuenta con una longitud de 1079 mm de largo y las cargas  $P_1$  y  $P_2$  se sitúan a 412 mm y 667 mm respectivamente.



**Figura 36.- Diagramas de corte y momento flector para guía lineal del eje X.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

Los valores resultantes del cálculo estructural simple se encuentran en la Tabla 27 para cálculos posteriores.

**Tabla 27.**

**Reacciones y momento flector en guía lineal del eje X.**

<b>Parámetros</b>	<b>Resultados</b>	<b>Unidades</b>
Reacción $R_{AX}$	240.2	N
Reacción $R_{BX}$	174.1	N
Momento Flector ( $M_{fX}$ )	98957.7	N.mm

**3.3.6.4. Diámetro de Guías Lineales**

Se toma el valor del esfuerzo máximo ya calculado por ser el mismo material, aplicándola en la fórmula 3.25 junto al momento flector  $M_{fX}$  encontrado, el módulo de resistencia es:

$$S = 401.18 \text{ mm}^3$$

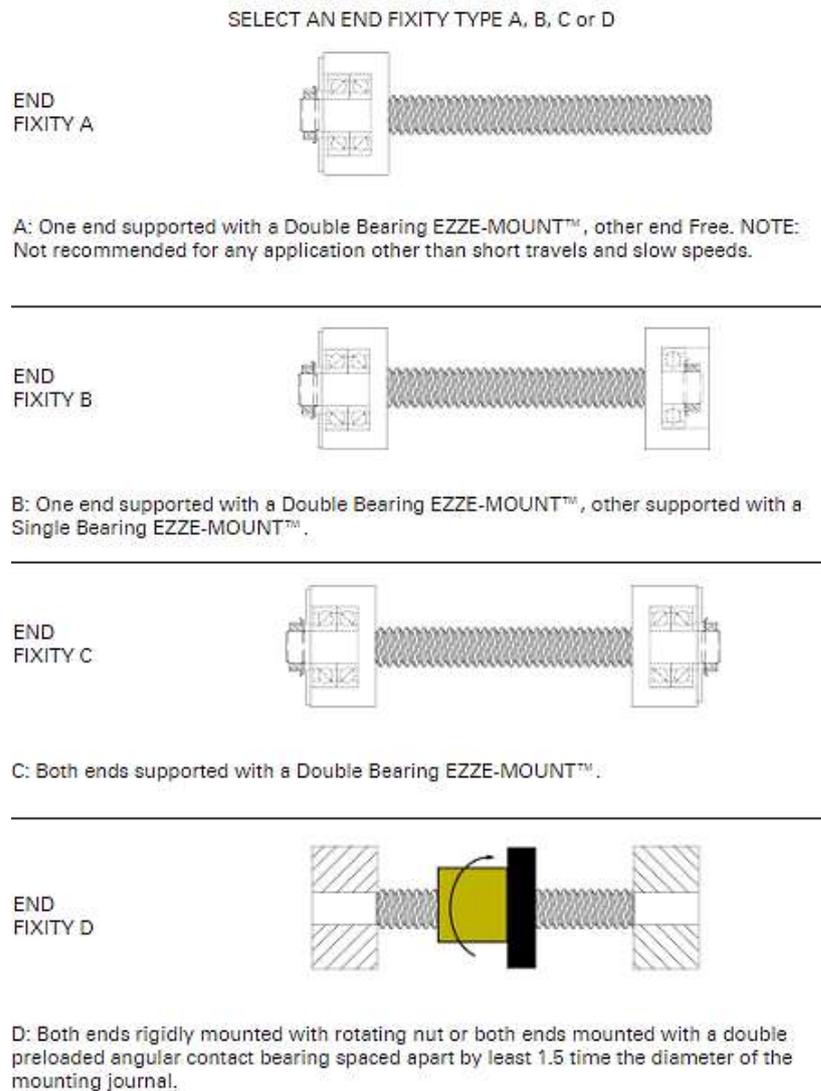
El diámetro del eje de la guía lineal se calcula mediante la fórmula 3.26 y se tiene que:

$$d_x = 15.98 \text{ mm}$$

Comparando los 3 diámetros encontrados, el de mayor valor es para el eje X siendo necesario un diámetro de 15.98 mm o superior. El diámetro comercial cercano es de 16 mm y por lo tanto se concluye que esta medida será la óptima para los 3 ejes ya que cubre satisfactoriamente a los valores calculados.

**3.3.7. Determinación de Diámetros de Husillos de Bola**

Para establecer el diámetro de los husillos se selecciona el tipo de soportes que tendrán en sus extremos, en la Figura 37 se puede apreciar diversas disposiciones de rodamientos.



**Figura 37.- Tipos de soporte para husillo de bola.**

**Fuente: (Nook I. , 2012)**

El soporte para los 3 ejes será de tipo B, donde la fijación se la realiza por rodamiento doble en un extremo y por un rodamiento simple en el otro.

### 3.3.7.1. Husillo de bolas Eje Z

La velocidad de avance de mesa (Tabla 13) y la longitud entre rodamientos serán los factores críticos para la determinación del tamaño de husillo mínimo aplicable. Para el eje Z se tiene una longitud de 230 mm de separación entre rodamientos. En la Figura 38 se traza un punto de intersección que determina el diámetro necesario.

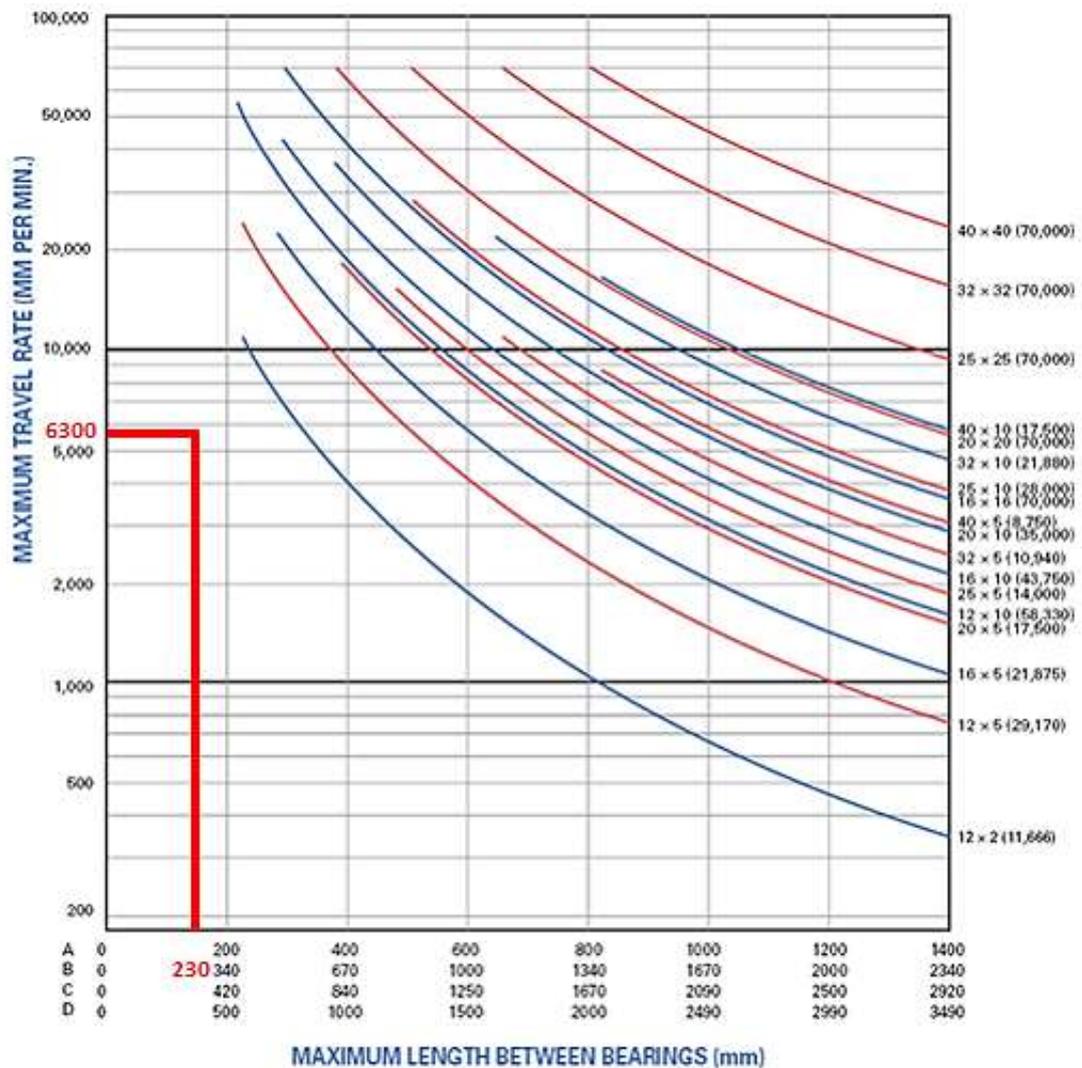


Figura 38.- Diagrama de selección husillo de bolas eje Z.

Fuente: (Nook, 2017)

La intersección entre la velocidad y la distancia está por debajo del diámetro de husillo de 12 mm con un paso de 2 mm.

### 3.3.7.2. Husillo de bolas Eje Y

Para el eje Y se tiene una longitud de 730 mm de separación entre rodamientos. En la Figura 39 se traza un punto de intersección que determina el diámetro necesario.

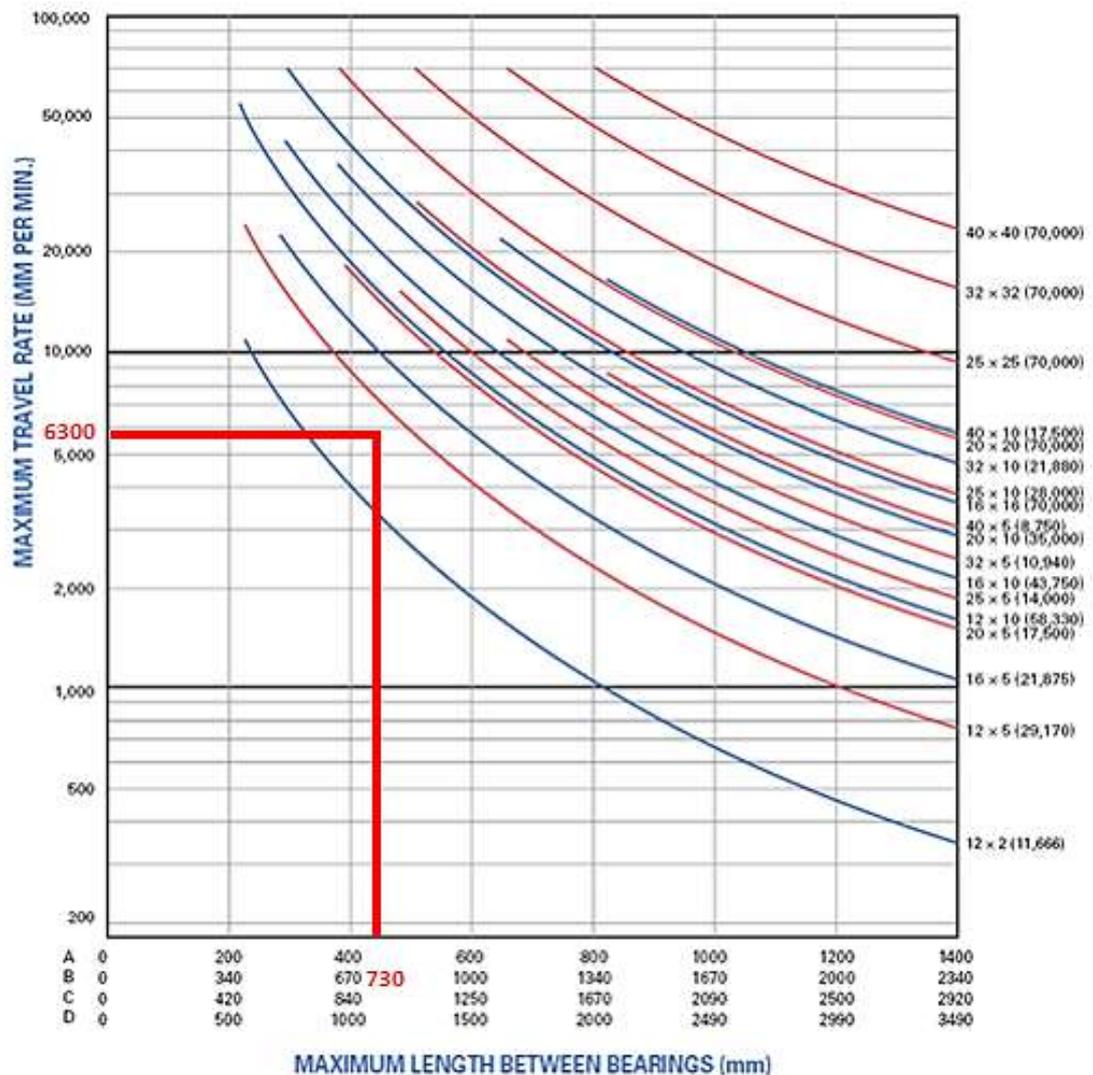


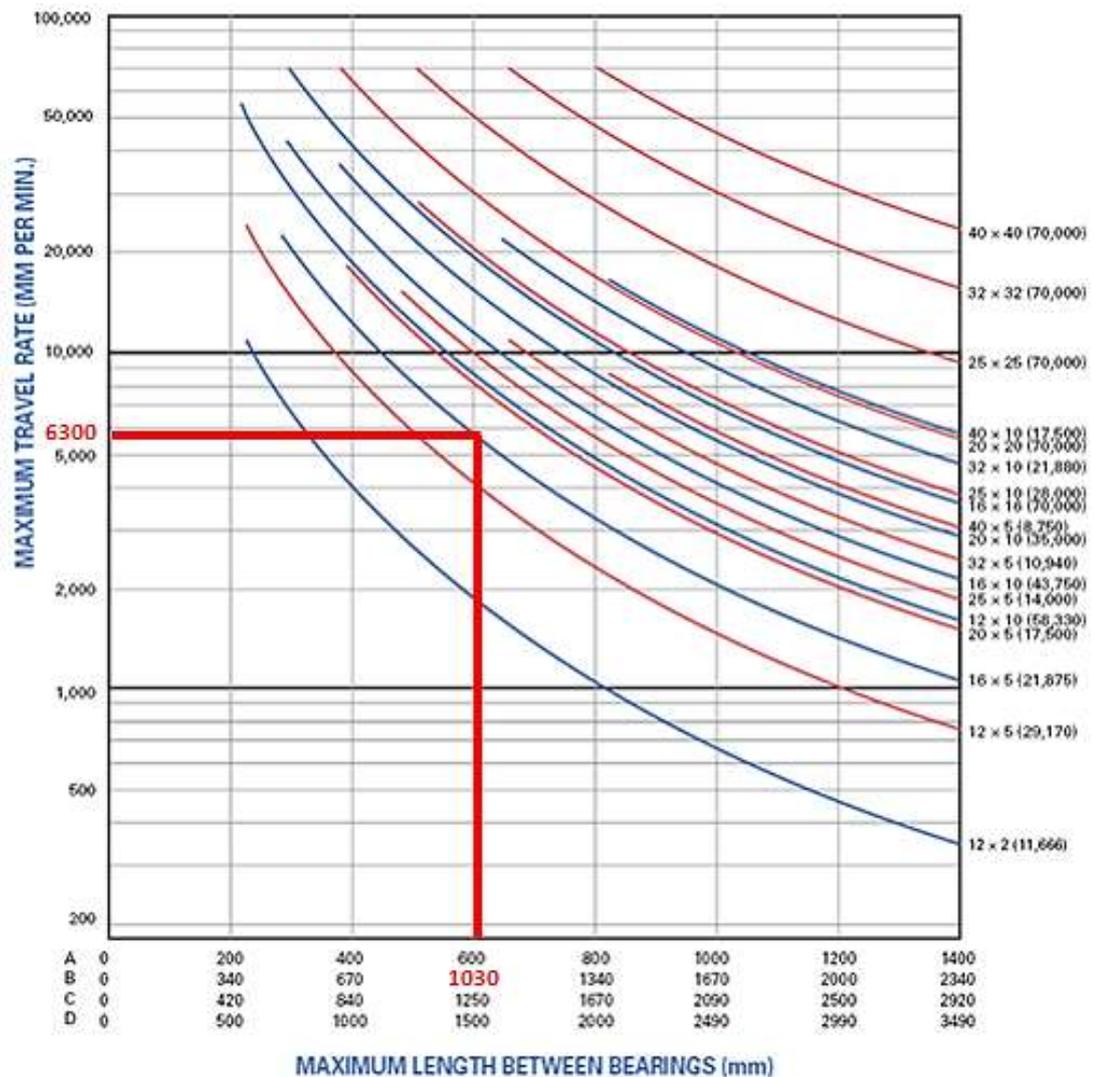
Figura 39.- Diagrama de selección husillo de bolas eje Y.

Fuente: (Nook, 2017)

El punto de intersección se encuentra por debajo del diámetro de 12 mm y con un paso de 5 mm.

### 3.3.7.3. Husillo de bolas Eje X

Para el eje X se tiene una longitud de 1030 mm de separación entre rodamientos. En la Figura 40 se traza un punto de intersección que determina el diámetro necesario.



**Figura 40.- Diagrama de selección husillo de bolas eje X.**

**Fuente: (Nook, 2017)**

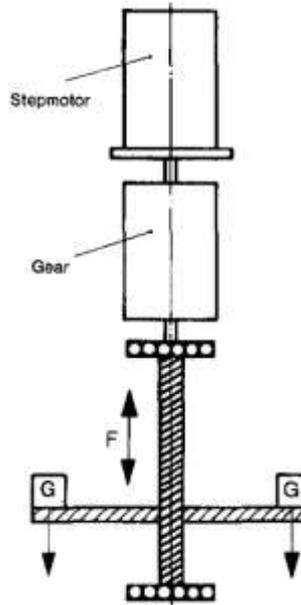
Esta vez la intersección se da en la curva de diámetro de 16 mm con un paso de 5 mm. Este es el mayor diámetro a comparación con los otros, es por esto que se selecciona este valor para los demás ejes ya que cubre a las necesidades requeridas.

### 3.3.8. Cálculo de Torques de los Motores a Pasos

Pasando con la selección del husillo de bolas, se procede con el cálculo del torque necesario para vencer el peso de cada conjunto de eje y fuerza de avance que genera la herramienta tupi.

### 3.3.8.1. Motor a Pasos Eje Z

En la Figura 41 se muestra la configuración de los elementos que producen el desplazamiento vertical de la carga. Hay que recalcar que los motores transmiten su movimiento a los husillos mediante acoplamientos haciendo que la relación de transmisión sea directa (1 a 1).



**Figura 41.- Accionamiento vertical del husillo de bolas.**

**Fuente: (Berger Lahr, 2015)**

En este caso el mayor torque que realizará el motor será cuando eleve toda la carga, para ello se describe la siguiente fórmula.

$$T_Z = F \left[ \frac{h}{(2 \times \pi \times \eta)} + (r_B \times \mu_B) \right] \frac{1}{i} \quad (3. 32)$$

En donde:

- $F$  [N]: Fuerza de avance y peso tupi.
- $h$  [mm]: Paso del husillo de bolas.
- $\eta$ : Eficiencia del husillo de bola.
- $r_B$  [mm]: Radio medio del husillo de bolas.
- $\mu_B$ : Coeficiente de fricción acero-acero.
- $i$ : Relación de transmisión.
- $T_Z$  [N.mm]: Par motor resultante.

El radio medio del husillo se lo puede verificar en el ANEXO 4. Los datos necesarios para ser reemplazados en la fórmula 3.32 se encuentran en la Tabla 28.

**Tabla 28.**

**Valores para la obtención del par motor eje Z.**

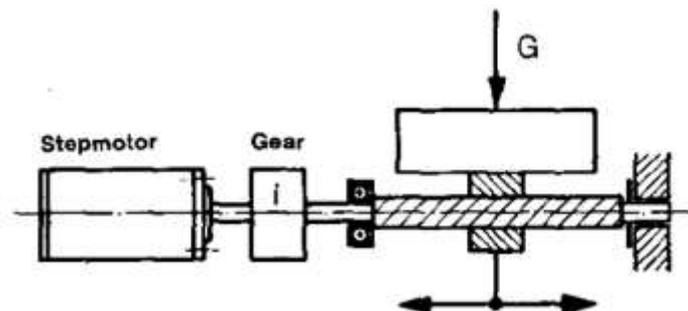
Parámetros	Datos	Unidades
Fuerza de avance ( $F_f$ )	558.66	N
Peso tupi ( $W_1$ )	25	N
$h$	5	mm
$\eta$	0.9	-
$r_B$	7.6	mm
$\mu_B$	0.74	-
$i$	1	-
$F (F_f + W_1)$	583.66	N

El par motor necesario es de:

$$T_Z = 3796 \text{ N.mm}$$

### 3.3.8.2. Motor a Pasos Eje Y

En la Figura 42 se visualiza la disposición de los elementos que realizan el movimiento horizontal de la carga. Esta disposición es tanto para el eje Y como para el eje X.



**Figura 42.- Accionamiento horizontal del husillo de bolas.**

**Fuente: (Berger Lahr, 2015)**

Para determinar el par motor, es necesario realizar una sumatoria de fuerzas que influyen en el movimiento como se muestra en la Figura 43.

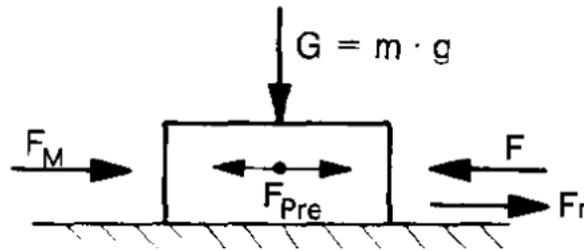


Figura 43.- DCL fuerzas que intervienen en eje Y.

Fuente: (Berger Lahr, 2015)

Tras el análisis de fuerzas se tiene que:

$$F = (\mu_B \times G) + F_M + F_{Pre} \quad (3.33)$$

En donde:

- $F$  [N]: Fuerza total en el husillo.
- $\mu_B$ : Coeficiente de fricción acero-acero.
- $G$  [N]: Fuerza de avance y peso conjunto eje Z.
- $F_M$  [N]: Fuerza de corte en el fresado.
- $F_{Pre}$  [N]: Fuerza de pre-tensión.

La fuerza de pre-tensión es igual a cero ya que no se utiliza ruedas dentadas ni correas, el acople directo de motor-husillo elimina este valor. Los datos se encuentran en la Tabla 29.

Tabla 29.

Valores para la obtención de la fuerza total en el husillo eje Y.

Parámetros	Datos	Unidades
Fuerza de avance ( $F_f$ )	558.66	N
Peso conjunto eje Z ( $W_1$ )	120	N
$\mu_B$	0.74	-
$F_M$	240.37	N
$F_{Pre}$	0	N
$G (F_f + W_1)$	678.66	N

La fuerza total en el husillo es:

$$F = 742.58 \text{ N}$$

Aplicando la fuerza hallada en la fórmula 3.32 y manteniendo los demás parámetros se tiene un par motor de:

$$T_Y = 4830 \text{ N.mm}$$

### 3.3.8.3. Motor a Pasos Eje X

La configuración de la Figura 42 se aplica para este eje ya que también realiza un movimiento horizontal. De igual forma hay que hallar la fuerza total en el husillo donde actúan la fuerza de avance y peso conjunto del eje Z y eje Y. Los datos se encuentran en la Tabla 30.

**Tabla 30.**

**Valores para la obtención de la fuerza total en el husillo eje X.**

Parámetros	Datos	Unidades
Fuerza de avance ( $F_f$ )	558.66	N
Peso conjunto eje Z y eje Y ( $W_1$ )	270	N
$\mu_B$	0.74	-
$F_M$	240.37	N
$F_{Pre}$	0	N
$G (F_f + W_1)$	828.66	N

La fuerza total en el husillo es:

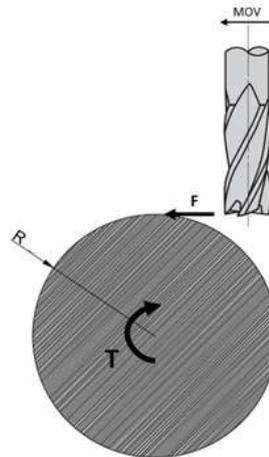
$$F = 853.58 \text{ N}$$

Aplicando la fuerza hallada en la fórmula 3.32 y manteniendo los demás parámetros se tiene un par motor de:

$$T_X = 5552 \text{ N.mm}$$

### 3.3.8.4. Motor a Pasos Eje Rotatorio o Eje A

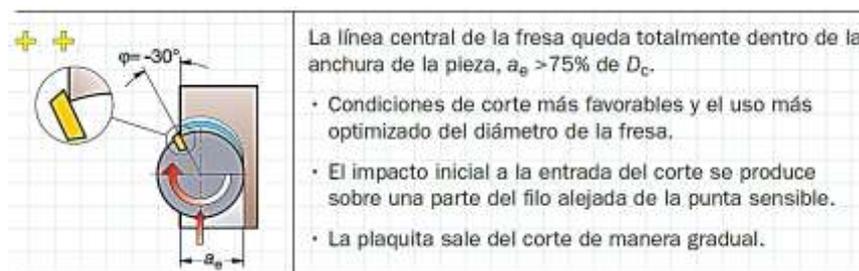
Este eje rotatorio debe mantener la pieza de trabajo fija o en movimiento simultáneo mientras se realice el maquinado. La Figura 44 es una representación de la fresa al momento de entrar en contacto con el stock.



**Figura 44.- Posicionamiento de la fresa en el stock de trabajo.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

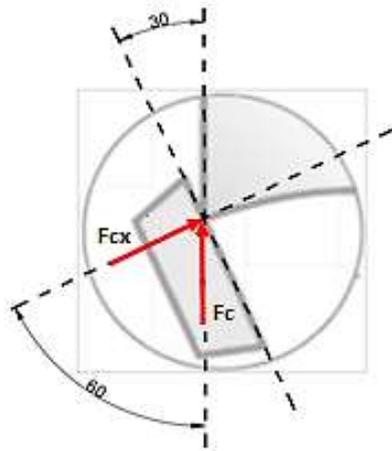
Según el libro de formación de SANDVIK, la posición de la fresa recomendada es donde la línea central de la fresa queda totalmente dentro de la anchura de la pieza,  $a_e > 75\%$  de  $D_c$ .



**Figura 45.- Posición recomendada de la fresa en el maquinado.**

**Fuente: (SANDVIK, Tecnología del Corte del Metal, 2016)**

El diente de la fresa al momento de internarse en el stock forma un ángulo de  $30^\circ$  y esto permite realizar una descomposición de fuerzas haciendo que la carga en el filo de la fresa se reduzca y evitando el impacto de la punta de la fresa al inicio del corte. Para calcular el par motor, se necesita la fuerza perpendicular al filo del diente de la fresa por lo que se presenta el diagrama de fuerzas siguiente.



**Figura 46.- Descomposición de la fuerza de corte a 30°.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

Las componentes de la fuerza de corte forman un triángulo rectángulo, basta con aplicar el coseno del ángulo de 60° para hallar la fuerza de interés.

$$\cos 60 = \frac{F_{cX}}{F_c} \quad (3.34)$$

Reemplazando la fuerza de corte y despejando la componente en X tenemos que:

$$F_{cX} = 120.19 \text{ N}$$

Se estableció que el diámetro posible de las figuras que se pueden maquinar es de 100mm, por lo tanto, se toma el radio como la mayor distancia a la que se encuentre la componente de la fuerza de corte (ver Figura 44).

Datos:

- $F_{cX} = 120.19 \text{ [N]}$ : Componente de la fuerza de corte.
- $d = 50 \text{ [mm]}$ : Distancia a la que se encuentra la punta de la fresa

Aplicando la fórmula de torque se tiene:

$$T_A = F_{cX} \times d \quad (3.35)$$

$$T_A = 6010 \text{ N.mm}$$

Comparando los torques calculados en cada eje el mayor valor es de 6010 N.mm para el eje rotatorio. El par motor comercial cercano para motores a pasos es de 6300 N.mm y se concluye que este valor será el óptimo para los 4 ejes ya que cubre satisfactoriamente a los valores calculados.

### 3.4. Diseño del Sistema Eléctrico y Control de Señales

El diseño eléctrico comprende la parte de control como la de potencia, en esta sección se detalla el dimensionamiento y comportamiento de cada uno de estos elementos que componen el sistema. En la parte de control se encuentran los elementos que se encargan de recibir, interpretar y emitir señales hacia los componentes de alta potencia. En lo que se refiere a la parte de potencia, se encarga de recibir las señales y las convierten en movimientos mecánicos.

#### 3.4.1. Requerimientos Eléctricos y de Control.

Al igual que la parte mecánica, el diseño eléctrico se la irá desarrollando por partes hasta obtener el sistema completo que provee de energía eléctrica y señales a la máquina. Para ello es primordial conocer los requisitos del cliente lo que dará como resultado un esquema general.

**Tabla 31.**

#### **Características eléctricas requeridas.**

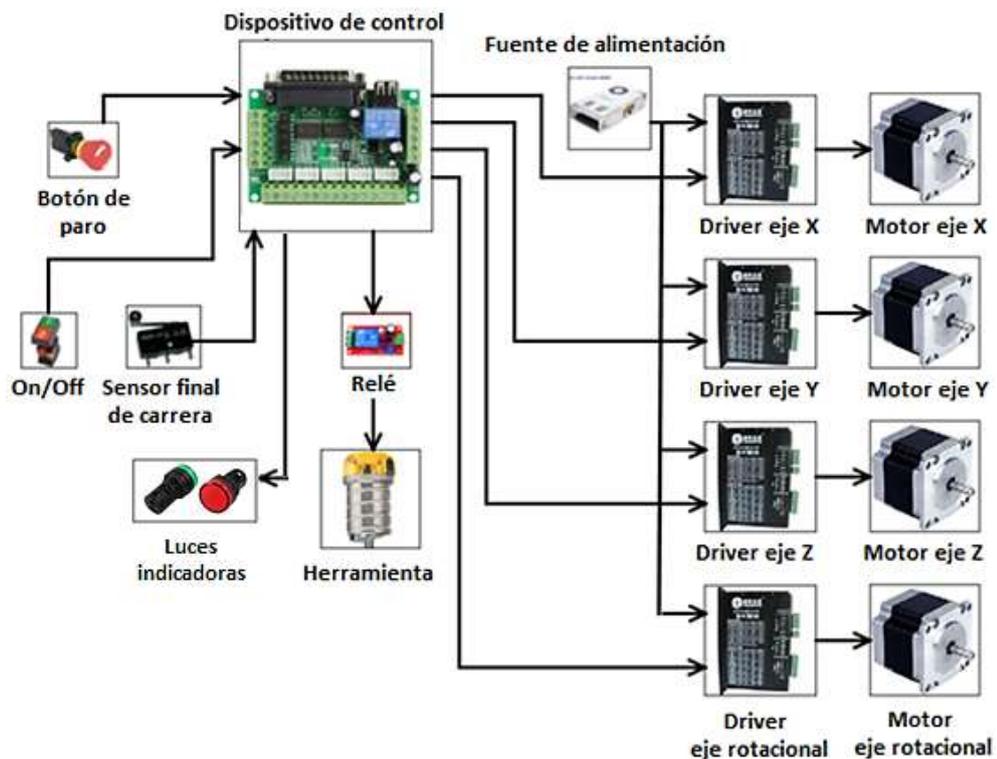
#	Característica	Descripción
1	Gabinete de control	La máquina debe contar con un gabinete de control donde se ubiquen todos los elementos eléctricos-electrónicos
2	Encendido de máquina	Mediante un interruptor de encendido general
3	Paro de emergencia	Presentar al menos un paro de emergencia que detenga el movimiento de los ejes y corte la energía de la herramienta tupí
4	Luces indicadoras	Elementos fundamentales para conocer el estado de la máquina

CONTINÚA 

5	Encendido de herramienta	De forma manual y automática
6	Posición HOME	Punto de inicio de la máquina con respecto al área de trabajo

Fuente: (Características por SETRA)

A continuación, se muestra el esquema del sistema general.



**Figura 47.- Esquema de conexiones eléctricas**

**Fuente: (Elaboración propia)**

### 3.4.2. Diseño de Potencia

El dimensionamiento empieza a partir de los datos técnicos obtenidos del motor a pasos seleccionado en la parte de diseño mecánico. Las especificaciones eléctricas del motor a pasos se presentan en la siguiente figura.

技术数据 (Electrical Specifications) :										
型号 Series: Model	步距角 Step Angle ( $^{\circ}$ )	机身長 Motor Length (mm)	电流 Rated Current (A)	电阻 Phase Resistance ( $\Omega$ )	电感 Phase Inductance (mH)	静力矩 Holding Torque (N.cm Min)	定位力矩 Detent Torque (N.cm Max)	转动惯量 Rotor Torque (Kg.c m <sup>2</sup> )	引线数 Lead Wire (No.)	重量 Motor Weight (g)
34HS6840	1.8	66	4.0	0.6	1.6	220	5.5	0.85	8	2.0
34HS6850	1.8	66	5.0	0.4	1.0	220	5.5	0.85	8	2.0
34HS6827	1.8	66	2.7	1.2	3.5	220	5.5	0.85	8	2.0
34HS7840	1.8	78	4.0	0.7	3.0	300	6.5	1.05	8	2.5
34HS7850	1.8	78	5.0	0.5	1.8	300	6.5	1.05	8	2.5
34HS7827	1.8	78	2.7	1.6	5.6	300	6.5	1.05	8	2.5
34HS9840	1.8	98	4.0	0.98	4.1	490	9.5	1.55	8	3.0
34HS9850	1.8	98	5.0	0.65	2.4	490	9.5	1.55	8	3.0
34HS9827	1.8	98	2.7	1.9	8.6	490	9.5	1.55	8	3.0
34HS19805-37B2	1.8	98	2.0	3.2	15	630	9.5	1.55	8	3.0
34HS1840	1.8	114	4.0	1.1	3.5	580	12.5	1.8	8	3.5
34HS1850	1.8	114	5.0	0.75	3.2	580	12.5	1.8	8	3.5
34HS1827	1.8	114	2.7	2.0	11.5	580	12.5	1.8	8	3.5
34HS1456	1.8	114	5.6	0.55	5.5	840	12.5	2.9	4	3.5
34HS2840	1.8	126	4.0	1.3	5.8	640	18.5	2.2	8	3.8
34HS2850	1.8	126	5.0	0.85	3.4	640	18.5	2.2	8	3.8
34HS2827	1.8	126	2.7	2.5	12.5	640	18.5	2.2	8	3.8
34HS5840	1.8	150	4.0	1.4	9.2	850	24.5	2.5	8	4.2
34HS5850	1.8	150	5.0	0.9	5.2	850	24.5	2.5	8	4.2
34HS5827	1.8	150	2.7	2.9	17.5	850	24.5	2.5	8	4.2
34HS5460	1.8	150	6.0	0.6	8	850	24.5	4	4	5.0
34HS5435C-37B2	1.8	150	3.5	1.8	21	1150	24.5	2.5	4	5.0

Figura 48.- Especificaciones eléctricas del motor paso a paso.

Fuente: (Longs Motor, 2011)

El motor a pasos posee una corriente máxima de 2.8 amperios pico por fase para su operación, se pueden mantener energizadas hasta dos fases al mismo tiempo debido al modo de funcionamiento en paso completo o en medio paso.

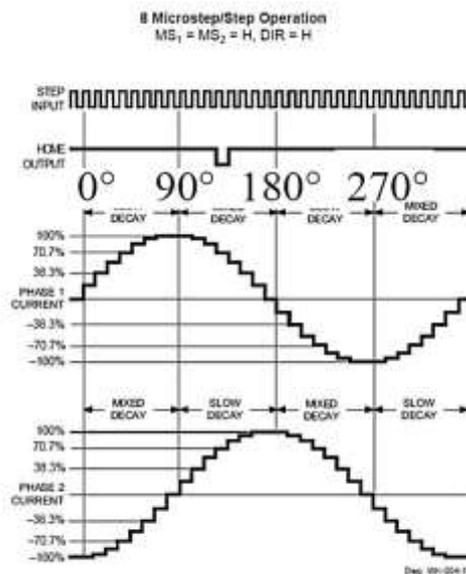
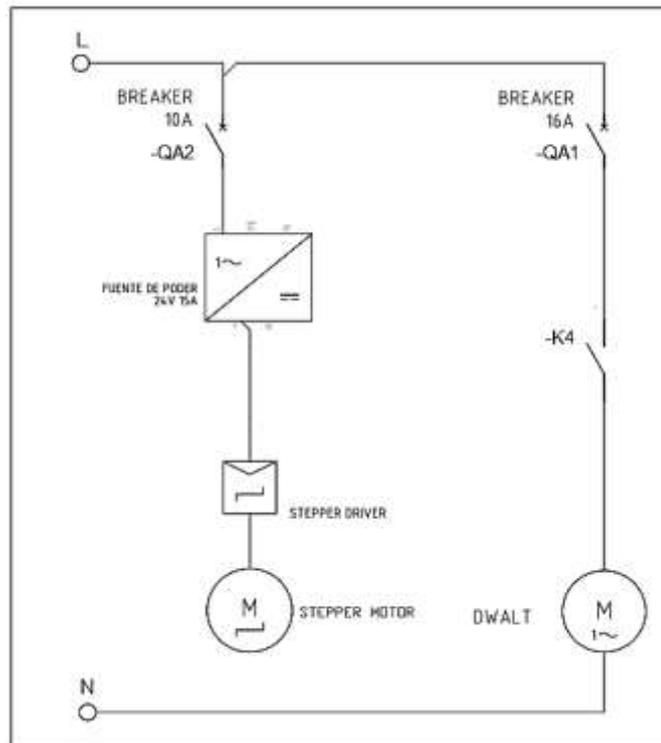


Figura 49.- Operación de pasos y micropasos.

Fuente: (Sparber, 2015)

En la Figura 50 se presenta el circuito de arranque del motor a pasos (STEPPER MOTOR) que recibe del driver la corriente y voltaje necesarios para ser puesto en marcha. Los breakers denotados como QA1 y QA2 dan protección al sistema, K4 es un contacto normalmente abierto asociado a una bobina de relé que es accionado por la tarjeta de control para la activación de la herramienta tupi.



**Figura 50.- Diagrama de potencia unifilar.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

#### **3.4.2.1. Driver para Motor a Pasos**

Estos controladores de motor a pasos reciben señales del dispositivo de control que corresponden al número de pasos y sentido de giro, su principal función es suministrar la corriente necesaria para que el motor pueda moverse con el torque requerido, los microstep drivers son capaces de suministrar una corriente sinusoidal permitiendo obtener micro pasos.

La ventaja de los micro pasos es una mayor resolución, en el modo de operación de medios pasos el motor provee únicamente el 70% del torque que tiene en el modo de paso completo. (Hopkins, 2012)

El motor elegido es de tipo híbrido debido a que es una mezcla entre los motores a pasos de reluctancia variable e imán permanente. Se selecciona el driver *DM860A* ya que es un controlador diseñado precisamente para trabajar con las 2 fases que cuentan los motores a pasos híbridos. Sus características son las siguientes:

- Alto rendimiento, bajo precio.
- Accionamiento de corriente de salida sinusoidal de 2 fases.
- Tensión de alimentación de 24VDC a 80VDC.
- Corriente de entrada menor a 6A.
- Corriente de salida entre 2.8A a 7.8A.
- E / S de señal opto-aislada.
- Protección contra sobretensión, bajo voltaje, cortocircuito de fase.
- Subdivisión de 14 canales y reducción automática de la corriente de inactividad.
- Ajuste de corriente de fase de salida de 8 canales.
- Alta velocidad de arranque
- Alto par de retención a altas velocidades

#### 3.4.2.2 Fuente de Poder

La fuente de poder debe suministrar energía a los drivers *DM860A* cuyo voltaje de alimentación está entre los 24 y 80 voltios en corriente continua. Como se observa en la Figura 49, las señales sinusoidales que controlan las fases del motor están desfasadas en 90°. El driver es configurado de tal manera que la corriente máxima suministrada sea de 2.8 amperios pico. Debido a que son cuatro motores y estos pueden ser accionados simultáneamente se tiene:

$$I_{fuente} = 4 \times 2.8A = 11.2A$$

Siendo  $I_{fuente}$  la corriente que debería suministrar la fuente para que todos los motores funcionen con el torque necesario, se selecciona una fuente de 24 voltios y 15 amperios por su disponibilidad en el mercado.

### 3.4.2.3. Protecciones Eléctricas.

Para la selección de los disyuntores o breakers se multiplica la corriente nominal utilizada por un factor de 1.25, dando protección contra sobre corrientes a todo el sistema. Este factor se debe a que los disyuntores están diseñados para operar a no más del 80% de su capacidad. (Barnes, 2013)

$$I_{disyuntor} = 1.25 I_{nominal} \quad (3.36)$$

**Tabla 32.**

#### Corriente para protecciones eléctricas

	Corriente nominal	Corriente de disyuntor
Dewalt	12 A en AC	15 A
Fuente	6.5 A en AC	8.125 A

Los disyuntores comerciales que se aproximan a los valores calculados son de 16 A y 10 A.

### 3.4.2.4. Relés

La capacidad de corriente de los contactos de los relés se determina mediante la ecuación 3.37. Se aumenta un 25% más de la corriente nominal debido a los picos de corriente que se producen cuando arranca el motor. (Lopez, 2013)

$$I_r = 1.25 \times I_n \quad (3.37)$$

En donde:

- $I_r [A]$ : Corriente del relé.
- $I_n [A]$ : Corriente nominal del circuito.

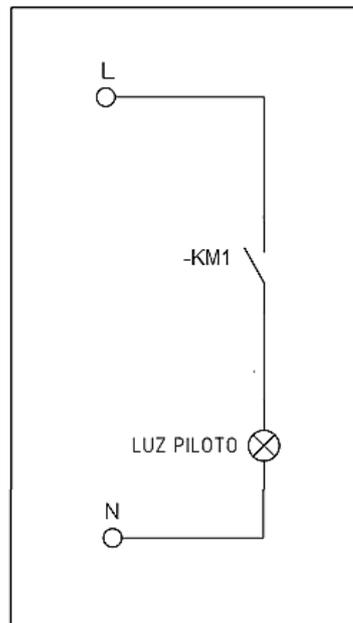
**Tabla 33.**

#### Corriente de operación de los relés.

	Corriente nominal	Corriente de relé
Dewalt	12 A en AC	15 A
Luces piloto	0.5 A	0.625 A

### 3.4.2.5. Luces Indicadoras

La Figura 51 presenta el esquema de conexión de las luces indicadoras, KM1 representa al contacto normalmente abierto de un relé comandado por la placa de control. Las luces muestran el estado de encendido o activo de la máquina y el paro de emergencia.



**Figura 51.- Diagrama de conexiones de luces indicadoras.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

### 3.4.2.6. Conductores Eléctricos.

El calibre del cable a utilizar es seleccionado según la capacidad que tiene para soportar cierta corriente (Figura 52). Los motores suministran una corriente de hasta 2.8 amperios pico por cada fase y la fuente proporciona hasta 15 amperios. Se emplea cable flexible aislado de cobre AWG 18 para la conexión entre los drivers y motores, AWG 16 para la conexión entre la fuente de poder y drivers.

En lo que corresponde a los conductores de las señales de control se emplea cables flexibles AWG 22 o mayor.

CALIBRE AWG ó MCM	SECCION mm <sup>2</sup>	FORMACION No. de hilos por diámetro mm.	ESPESOR AISLAMIENTO mm.	DIAMETRO EXTERIOR mm.	PESO TOTAL Kg/Km	CAPAC. DE CORRIENTE para 1 conductor al aire libre Amp.	TIPO CABLE	ALTERNAT. DE EMBALAJE.
24	0,205	7 x 0,20	0,51	1,63	5,14	---	FXT	A,E
22	0,324	11 x 0,20	0,51	1,78	7,62	---	FXT	A,E
20	0,519	17 x 0,20	0,76	2,47	9,98	5	FXT	A,E
18	0,823	12 x 0,30	0,76	2,72	13,43	7	TFF	A,E
16	1,310	19 x 0,30	0,76	3,02	18,93	10	TFF	A,B
14	2,08	30 x 0,30	1,14	4,17	32,30	25	TW-F	A,B
12	3,31	25 x 0,41	1,14	4,67	46,50	30	TW-F	A,C
10	5,26	40 x 0,41	1,14	5,26	67,90	40	TW-F	A,D
8	8,37	7 x (17x0,30)	1,52	7,31	119,70	60	TW-F	A,B,E
6	13,30	7 x (27x0,30)	1,52	8,38	174,50	80	TW-F	A,E
4	21,15	7 x (24x0,41)	1,52	9,80	269,90	105	TW-F	A,E
2	33,62	7 x (18x0,60)	1,52	11,55	402,90	140	TW-F	A,E
1	42,36	7 x (21x0,60)	2,03	13,62	521,30	165	TW-F	A,D,E

**Figura 52.- Calibre de conductores flexibles de cobre**

**Fuente: (Electrocables, 2012)**

### 3.4.3. Sistema de Control

#### 3.4.3.1. Dispositivo de Control

El sistema lo compone la tarjeta de control Breakout Board (BOB) DB25-1205. Es una tarjeta con puerto paralelo diseñada para permitir una conexión flexible entre la máquina CNC y el computador, traduce las señales provenientes del computador y provee señales de dirección y paso a la CNC, Las características de este dispositivo son:

- Conductor de motor a pasos con interface para hasta seis ejes.
- Conector macho DB25
- DB25 pines de entrada: P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P14, P16, P17.
- DB25 pines de salida: P10, P11, P12, P13, P15.
- DB25 GND pin: P18-P25
- Voltaje de alimentación 5 VDC y soporte para Mach3.
- Acoplador óptico incorporado.

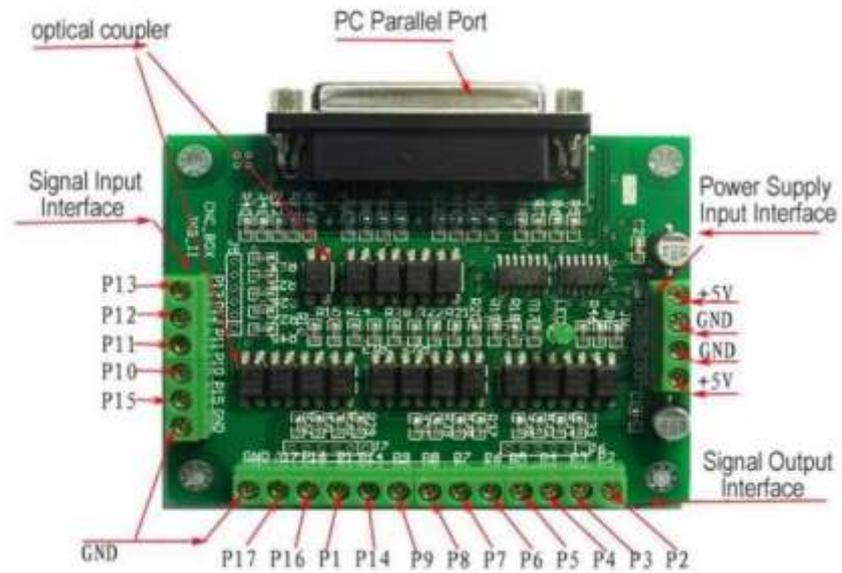


Figura 53.- Ubicación de pines del dispositivo de control.

Fuente: (Wantmotor, 2016)

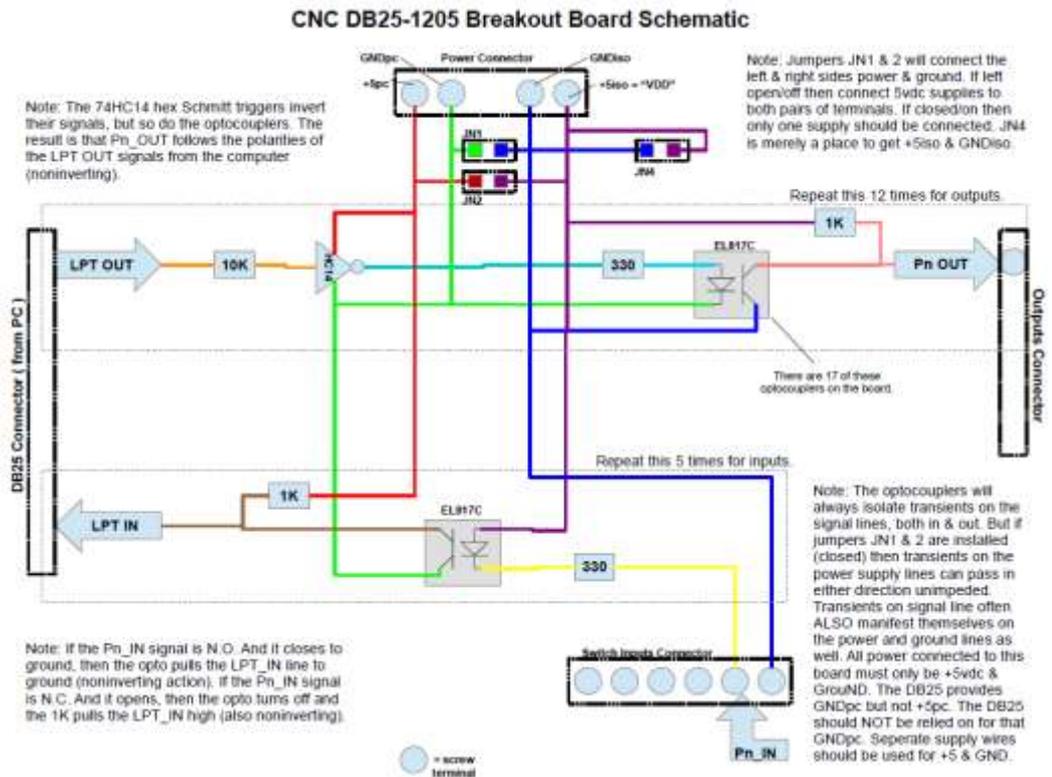
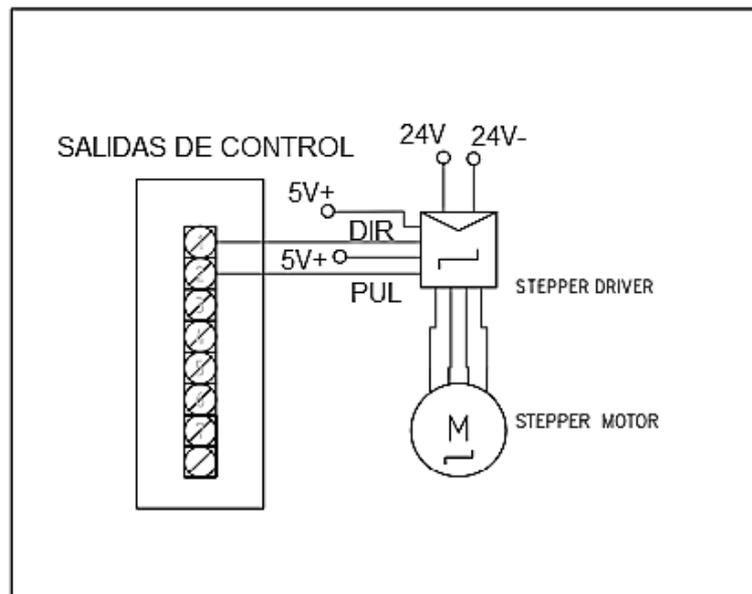


Figura 54.- Diagrama de los circuitos internos de los pines.

Fuente: (Wantmotor, 2016)

### 3.4.3.2. Control de Motores

Los pines de salida DIR y PUL de la tarjeta que corresponden a los pines 2-9 proporcionan señales que contienen información del número de pasos y sentido de giro. El driver interpreta y traduce estas señales en pulsos y las envía hacia el motor con la corriente y voltaje necesarios.

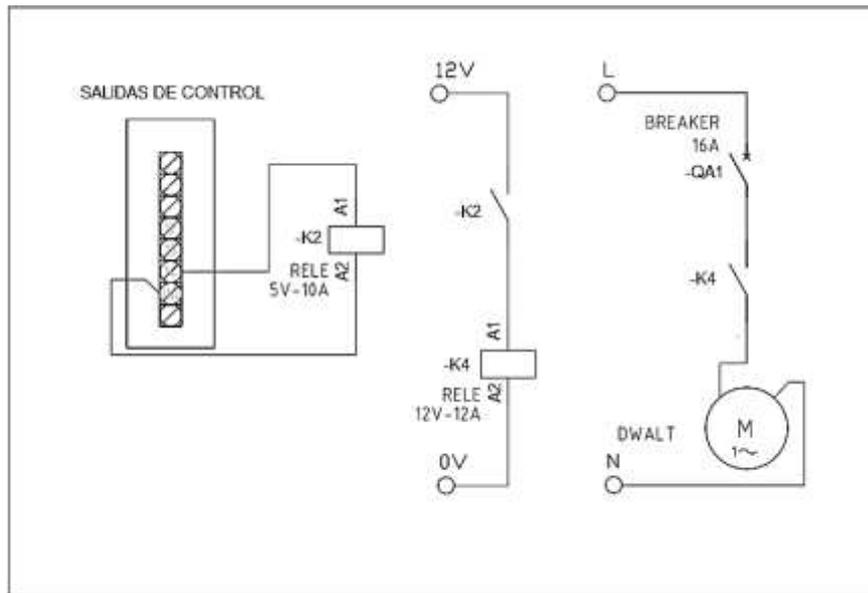


**Figura 55.- Circuito de control para motor a pasos.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

### 3.4.3.3. Control de la Herramienta

La fresadora Dewalt se controla mediante uno de los puertos de salida de la tarjeta de control, la cual excita la bobina de un relé que conmuta uno de sus contactos normalmente abiertos permitiendo el encendido de la fresadora, la velocidad de la herramienta se controla manualmente desde la propia herramienta.

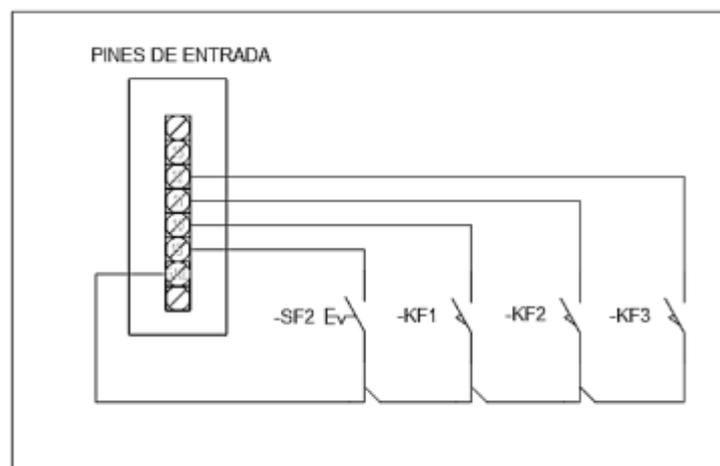


**Figura 56.- Circuito de control de la herramienta.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

#### 3.4.3.4. Sensores de Contacto y Paro de Emergencia

Estos elementos se conectan directamente a la placa de control a sus pines de entrada 10 - 13 y a GND. Los sensores funcionan como indicadores de posición para la máquina señalando un límite de carrera en cada uno de sus ejes de traslación. Cuando el sensor se activa, cierra el circuito enviando una señal que es interpretada por el software de control, este sistema permite enviar a la herramienta a una posición de HOME.



**Figura 57.- Circuito de conexión de sensores fin de carrera y botón de paro.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

El detalle de los circuitos de potencia y control se encuentra en el plano de conexiones eléctricas y electrónicas. (ANEXO 6)

### 3.4.4. Gabinete de Control

Se construyen con la finalidad de proteger los equipos de automatización o control, con las características de funcionamiento inherentes a sistemas eléctricos de potencias bajas. Pueden ser montados en pared, o acoplados a alguna estructura. (INEN, 2010)

Debido a la aplicación de la máquina se selecciona un gabinete con estándar de protección IP-65, ya que suministra protección contra polvo y el ingreso de agua para evitar cortocircuitos. El gabinete dispone de canaletas con el propósito de guiar los cables de conexión, rieles perforados que soportan los elementos de control y protección, además los elementos como pulsadores, interruptores y luces piloto se colocan acorde a normativas, en las que se detalla la correcta distribución de dichos elementos en el tablero de control.

Las medidas escogidas son: 400 mm de altura, 600 mm de base y 200 mm de profundidad, siendo el espacio suficiente para los elementos ya descritos con anterioridad. La Figura 58 hace referencia a la distribución de los componentes eléctricos – electrónicos dentro del gabinete.

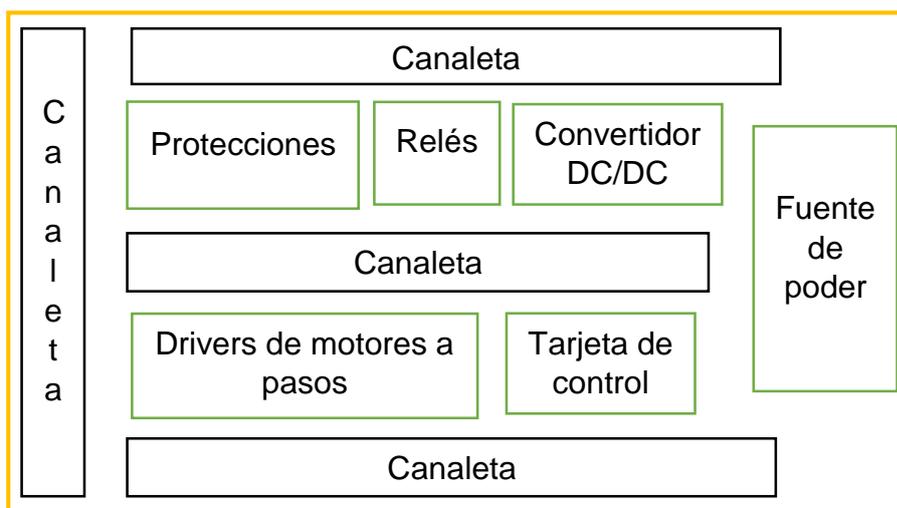


Figura 58.- Ubicación de los elementos de potencia y control.

Fuente: (Elaboración propia)

## CAPÍTULO IV

### CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

Para la construcción de la estructura de la máquina se emplean procesos de manufactura y tecnologías de producción. Una vez realizado el diseño en el software de diseño asistido por computador, se evalúa el aspecto final del producto, dimensiones y se verifica que no existan posibles colisiones a lo largo del recorrido entre los distintos componentes.

Las tecnologías utilizadas se enlistan a continuación. Las siglas mostradas representarán a estas operaciones posteriormente en diagramas de proceso:

- Taladrado. (TA)
- Corte por chorro de agua. (CO)
- Machuelado. (MA)
- Doblado. (DO)
- Soldadura. (SO)
- Técnicas de ajustaje y acabado. (AA)
- Pintura (PI)



**Figura 59.- Corte de placas de acero por chorro de agua.**

**Fuente: (Elaboración propia)**



**Figura 60.- Taladrado y machuelado en estructura metálica.**

**Fuente: (Elaboración propia)**



**Figura 61.- Ajustaje y acabado en la estructura de soporte de la máquina.**

**Fuente: (Elaboración propia)**



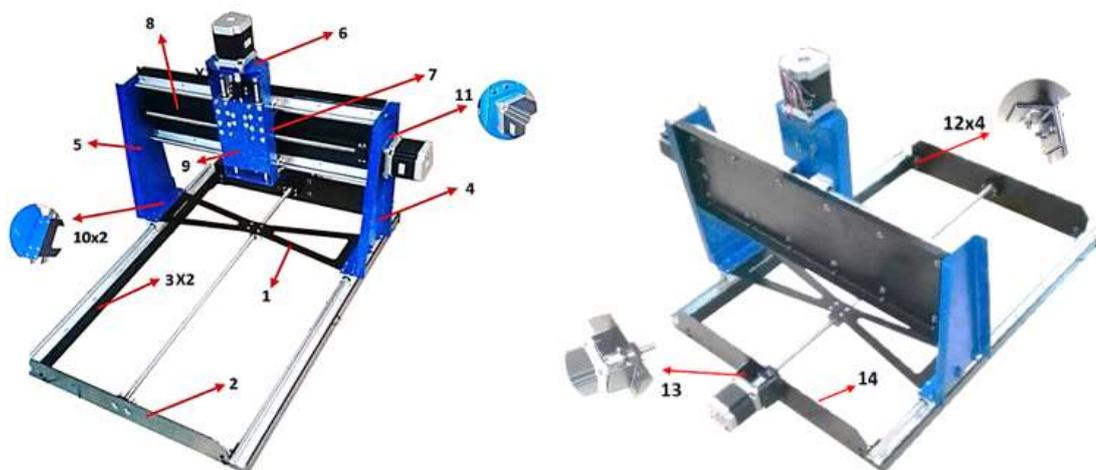
**Figura 62.- Pintado de placas metálicas.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

#### **4.1. Diagrama de Procesos de Construcción**

El diagrama de procesos es una herramienta que permite la representación gráfica de las distintas operaciones que se realizarán a un material hasta obtener una pieza o producto terminado. Se presentan dos diagramas de procesos como ejemplos en los que se observan todas las tecnologías utilizadas. El diagrama completo se encuentra en el ANEXO 7.

Las piezas que forman parte de la estructura son enumeradas para identificarlas y llevar a cabo el diagrama de los procesos respectivos por el que tuvieron que pasar cada pieza.



**Figura 63.- Enumeración de partes y piezas de cada eje.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

#### 4.1.1. Fabricación de Soporte Para Eje Z

Esta placa sostiene a todos los elementos que componen el eje Z, el corte por chorro de agua es preciso de modo que la forma y dimensiones son las establecidas en el software CAD. Se realiza un doblado a 90° de sus salientes; la unión con la placa que sostiene al motor se la hace por puntos de suelda. Se efectúan perforaciones con el taladro para fijar con pernos y tuercas al sistema de movimiento lineal. Se la pinta con soplete para el acabado final.

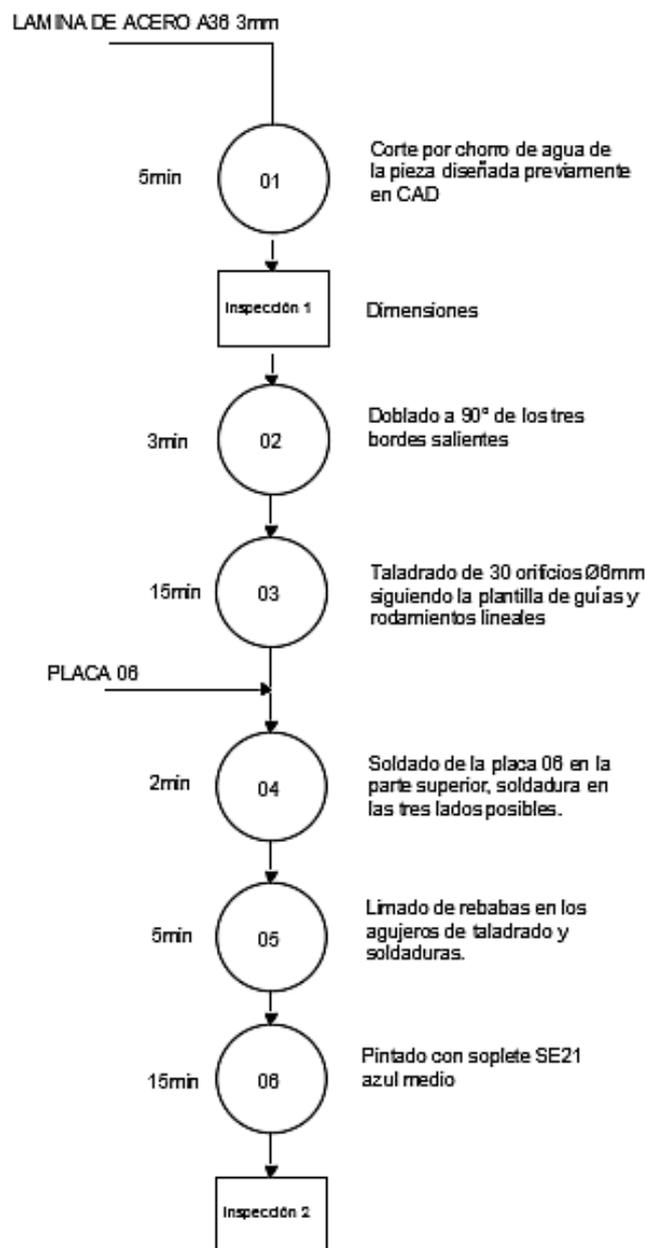


Figura 64.- Diagrama de procesos para soporte del eje Z.

Fuente: (Elaboración propia)

#### 4.1.2. Base para Guía Lineal del Eje X

El peso del eje Z y eje Y son soportados por el tubo estructural cuadrado. El corte se la hace mediante tronzadora a la medida necesaria, de igual manera se usa el taladro para las perforaciones, se utiliza un machuelo para fijar la guía lineal mediante tornillo. Las rebabas son eliminadas con lima y se coloca pintura para mejorar su acabado.

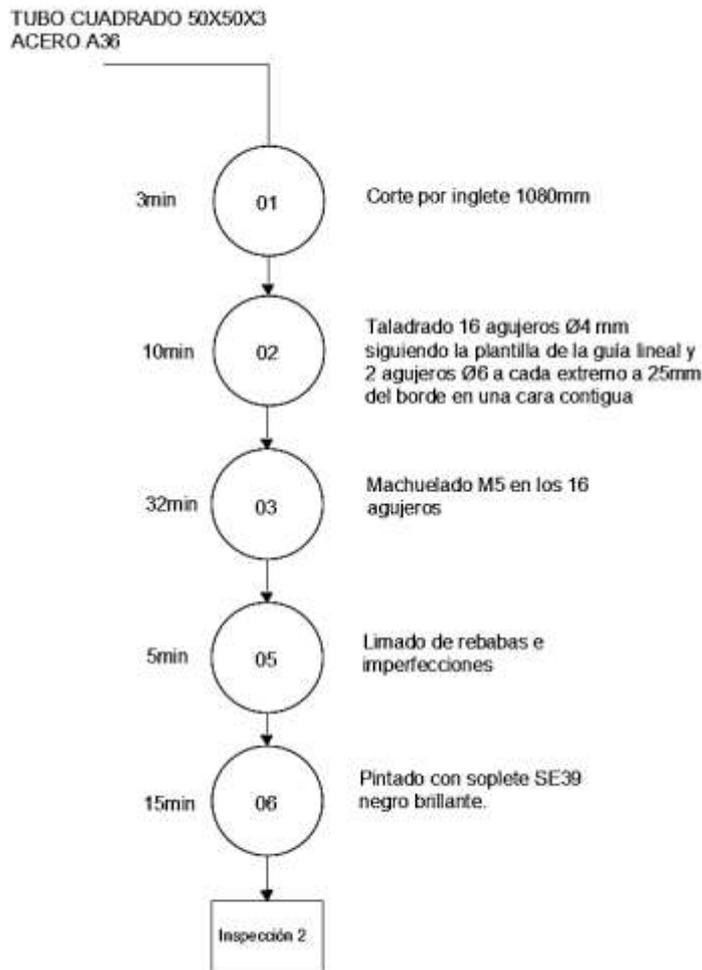


Figura 65.- Diagrama de procesos para base eje X.

Fuente: (Elaboración propia)

El diagrama de procesos completo se encuentra en el ANEXO 7.

## 4.2. Detalle de Construcción

### 4.2.1. Soporte de la máquina

La base en donde se asentará la máquina está construida en tubo cuadrado de acero ASTM A500 de 40 mm de lado por 2 mm de espesor. Los procesos que intervienen para su manufactura son: tronzado, limado, soldado, perforación y pintura. La Figura 66 se aprecia la estructura acabada.

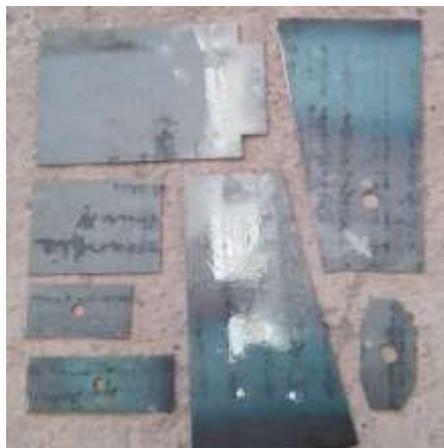


**Figura 66.- Soporte base de la máquina CNC.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

### 4.2.2. Partes y piezas

Las placas de soporte para los elementos de transmisión y transformación de movimiento y guías de movimiento lineal se las realiza en plancha de acero A36 de 3mm de espesor. El diseño final CAD entrega las medidas que lleva cada pieza. Un método rápido y económico para lograr las formas de las piezas es por medio de una máquina de corte por chorro de agua CNC.



**Figura 67.- Cortes en acero de 3mm por chorro de agua.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

#### 4.2.3. Alineación de Ejes

Para que exista movimiento en cada eje, lo primordial es que cada par de guías lineales se encuentren paralelas, ya que si no lo están se produce rozamiento entre los rodamientos dificultando el desplazamiento en los rieles. El husillo de bolas se coloca a la mitad de las guías lineales, de esa manera el peso a mover es distribuido de manera equitativa. Uno de los requerimientos importantes del cliente es que la máquina sea desmontable, así que la sujeción entre componentes se la realiza con pernos y tuercas de diferente diámetro y largo.



**Figura 68.- Ensamble completo de los ejes XYZ.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

#### 4.2.4. Pintura

Para dar protección contra corrosiones y mejorar el aspecto de la máquina, se procede a desmontarla para pintar una a una las partes estructurales. La capa de pintura actúa como una barrera protectora contra el oxígeno. Una vez seca, se la vuelve a armar quedando lista para el ensamble de los demás elementos.



**Figura 69.- Aspecto final después del pintado.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

#### **4.2.5. Mesa de trabajo**

La mesa de trabajo con la que cuenta la máquina está fabricada en tablero MDF de 5 mm de espesor en 3 capas. El corte de cada capa es de diferente medida, así se logra canales por donde ingresa el perno de las placas sujetadoras similar a los tableros panelados.



**Figura 70.- Fabricación de mesa de trabajo.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

#### 4.2.6. Ensamble Final

Los motores a pasos son acoplados a cada eje. La estructura de los ejes XYZ es colocada sobre la base quedando a una altura ergonómica de 840mm. La mesa de trabajo es puesta en su lugar junto al 4to eje.



Figura 71.- Estructura finalizada.

Fuente: (Elaboración propia)

#### 4.3. Implementación de Control Numérico

Terminada la estructura de la máquina se procede con el cableado de los equipos electrónicos. Dentro del gabinete de control se sitúan los elementos en la posición antes establecida.



Figura 72.- Gabinete y elementos de control.

Fuente: (Elaboración propia)



**Figura 73.- Distribución de los elementos en el espacio asignado.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

#### **4.3.1. Cableado Eléctrico y Electrónico**

Se implementó el gabinete con las respectivas protecciones, así como también con el correcto guiado de cables por canaletas. El huso de pines huecos al final de cada cable facilita la conexión en los terminales de los dispositivos.



**Figura 74.- Cableado finalizado.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

#### **4.3.2. Tablero de Control.**

Por lo establecido en los requerimientos eléctricos, el tablero cuenta con un interruptor de encendido de la máquina con su respectiva señal luminosa.

El botón de paro de emergencia se encuentra debidamente identificado para detener el proceso de tallado si existe algún error en la máquina o por peligro de sufrir daños en personas y operarios.



**Figura 75.- Tablero de control.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

#### 4.4. Tiempos de Producción

##### 4.4.1. Tiempo de Construcción

En los diagramas de procesos se especifica el tiempo aproximado de cada una de las operaciones, sin embargo, es necesario conocer el tiempo total estimado de construcción de la máquina.

**Tabla 34.**

##### Tiempos de operación en la construcción

PIEZA x CANTIDAD	OPERACIÓN							SUBTOTAL (min)
	CO	TA	MA	DO	SO	AA	PI	
1	6	10				4	20	40
2	4	8				2	20	34
3 x 2	6	20	64			6	40	136
4	5	7		2		4	20	38
5	4	5		2		4	20	35
6	2	2				2		6
7	5	15		3	5	3	20	51
8	5	30		6		4	20	65
9	2	12				2	15	31
10 x 2	6	14				8	30	58
11	2	8		8		2	20	40

CONTINÚA ⇨

12 x 4	8	16	12	30	66
13	2	2	2	15	21
14	5	8	4	20	37
				TOTAL	658

Se estima el tiempo total de operación de 10 horas con 58 minutos sin tomar en cuenta el tiempo de ensamblaje.

#### 4.4.2. Tiempo de ensamblaje.

Se toma en consideración la interacción de los distintos componentes para el correcto ensamble de la máquina, se han utilizado alrededor de 200 pernos para el ensamble total. Los tiempos aproximados de ensamblaje se muestran en la tabla siguiente.

**Tabla 35.**

#### **Tiempos de ensamble**

<b>ENSAMBLE</b>	<b>SUBTOTAL (min)</b>
Eje X	120
Eje Y	180
Eje Z	150
Eje A	30
Gabinete de control	300
Panel de control	60
<b>TOTAL</b>	<b>840</b>

Se destinó alrededor de 14 horas para completar el ensamble de la máquina CNC.

## CAPÍTULO V

### PRUEBAS Y RESULTADOS

Una serie de pruebas serán realizadas en cada eje para conocer la precisión en su movimiento. Para ello se hace referencia al control estadístico de procesos el cual indicará si los ejes cuentan con la precisión que se requiere por parte del cliente.

#### 5.1. Control Estadístico de Procesos

Utiliza estadísticas y herramientas como gráficas de control para determinar si un proceso está o no bajo control. Se requiere de recolección, organización y una clara interpretación de los datos. Cualquier proceso puede sufrir variabilidad por diferentes causas. La carta de control para este caso será la de variables, denominado Gráfico  $\bar{X}$ -R ya que usa el promedio de las muestras tomadas y el rango de variación de las medidas. Para determinar si un proceso está controlado, todos los datos recolectados deben estar dentro de los límites permitidos caso contrario dicho proceso no se encuentra bajo control estadístico.

Las fórmulas para hallar los límites son:

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{x}} + A_2(\bar{R}) \quad (5.1)$$

$$LCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{x}} - A_2(\bar{R}) \quad (5.2)$$

En donde:

- $UCL_{\bar{X}}$ : Límite superior del promedio.
- $LCL_{\bar{X}}$ : Límite Inferior del promedio.
- $\bar{\bar{x}}$ : Valor promedio de  $\bar{x}$
- $A_2$ : Constante de proporción
- $\bar{R}$ : Promedio del rango

Las fórmulas para hallar el rango son:

$$UCL_R = D_4(\bar{R}) \quad (5.3)$$

$$LCL_R = D_3(\bar{R}) \quad (5.4)$$

En donde:

- $UCL_R$ : Límite superior del rango.
- $LCL_R$ : Límite Inferior del rango.
- $D_3$  y  $D_4$ : Constantes de proporción para cartas de control
- $\bar{R}$ : Promedio del rango

Los valores de las constantes de proporción son:

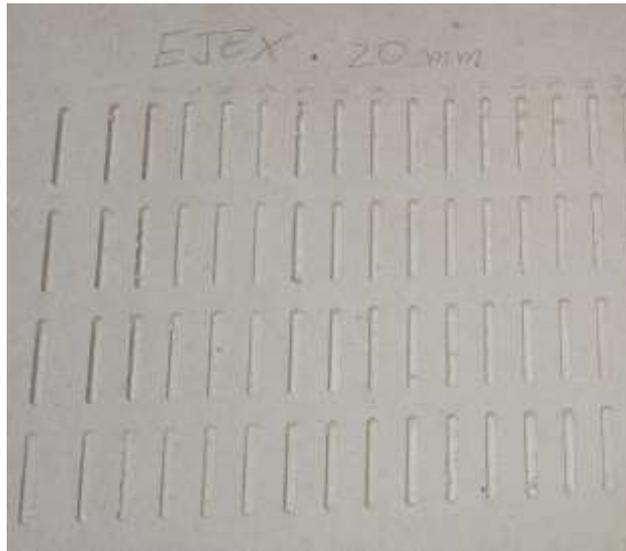
FACTORES PARA CALCULAR LÍMITES DE CONTROL 3 $\sigma$			
PARA GRAFICAS $\bar{X}$ Y $\bar{R}$			
Tamaño de n en cada muestra (N)	Para Gráfica $\bar{X}$ Factor $A_2$	Para Gráfica $\bar{R}$	
		Factor para L.I.C. $D_3$	Factor para L.S.C. $D_4$
2	1,880	0,000	3,267
3	1,023	0,000	2,575
4	0,729	0,000	2,282
5	0,577	0,000	2,115
6	0,483	0,000	2,004
7	0,419	0,076	1,924
8	0,373	0,136	1,864
9	0,337	0,184	1,816
10	0,308	0,223	1,777
11	0,285	0,256	1,744
12	0,266	0,284	1,716
13	0,249	0,308	1,692
14	0,235	0,329	1,671
15	0,223	0,348	1,652
16	0,212	0,364	1,636
17	0,203	0,379	1,621
18	0,194	0,392	1,608
19	0,187	0,404	1,596
20	0,180	0,414	1,586

Figura 76.- Valores de proporción para número de subgrupos.

Fuente: (Toro, 2015)

### 5.1.1. Carta de Control para Eje X

Para el eje X se toman 15 subgrupos de 4 muestras cada una, se recorre el eje 20 mm para obtener ranuras, las medidas se toman con un calibrador digital para observar la variación de cada ranura.



**Figura 77.- Probeta de ranuras en dirección del eje X.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

Los datos recolectados son presentados en la Tabla 36.

**Tabla 36.**

**Medidas recolectadas de la probeta en dirección del eje X.**

Muestras	M1	M2	M3	M4	Promedio	Rango
1	20,05	19,98	20	20	20,0075	0,07
2	19,98	19,94	20,01	20,02	19,9875	0,08
3	20,02	20,05	20,07	20,07	20,0525	0,05
4	20,07	19,99	20,02	20,01	20,0225	0,08
5	20	20,06	20,02	20,1	20,045	0,1
6	20	20,04	20	20	20,01	0,04
7	19,98	20,03	20,03	19,95	19,9975	0,08
8	20	20	20	20,04	20,01	0,04
9	20,06	19,92	20,03	20,04	20,0125	0,14
10	19,94	19,93	19,97	20,05	19,9725	0,12
11	19,94	19,95	19,98	20,03	19,975	0,09
12	19,98	19,99	20	19,96	19,9825	0,04
13	20	19,98	19,98	20	19,99	0,02
14	19,99	20	20,02	20,05	20,015	0,06
15	20	20	20	20,1	20,025	0,1
				Promedio final	20,007	0,074

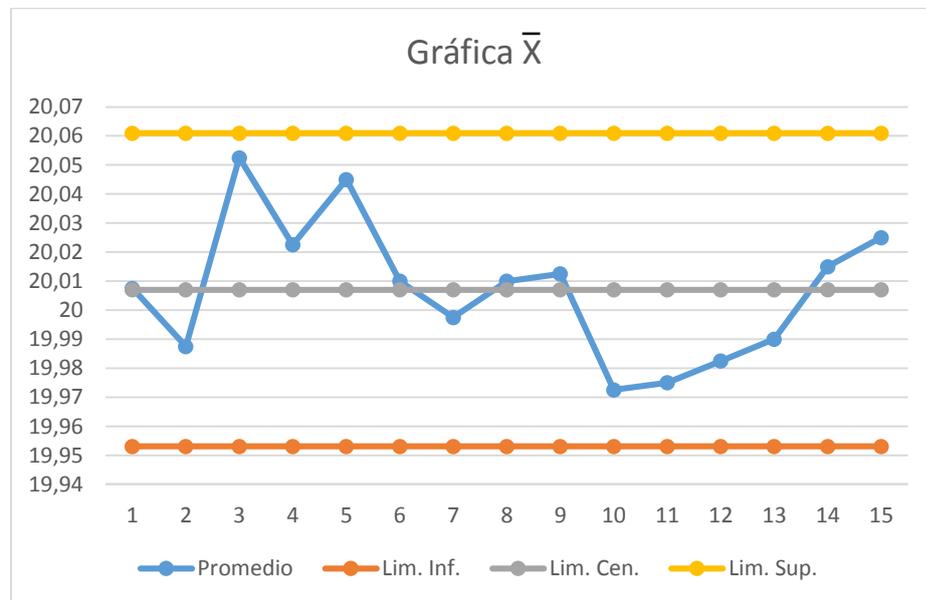
Utilizando los valores calculados del promedio, rango y las constantes de proporción en las fórmulas 5.1 a 5.4 se tiene que:

**Tabla 37.**

**Límites para carta de control eje X.**

Límites	Valor
$UCL_{\bar{X}}$	20,060946
$LCL_{\bar{X}}$	19,953054
$UCL_R$	0,168868
$LCL_R$	0

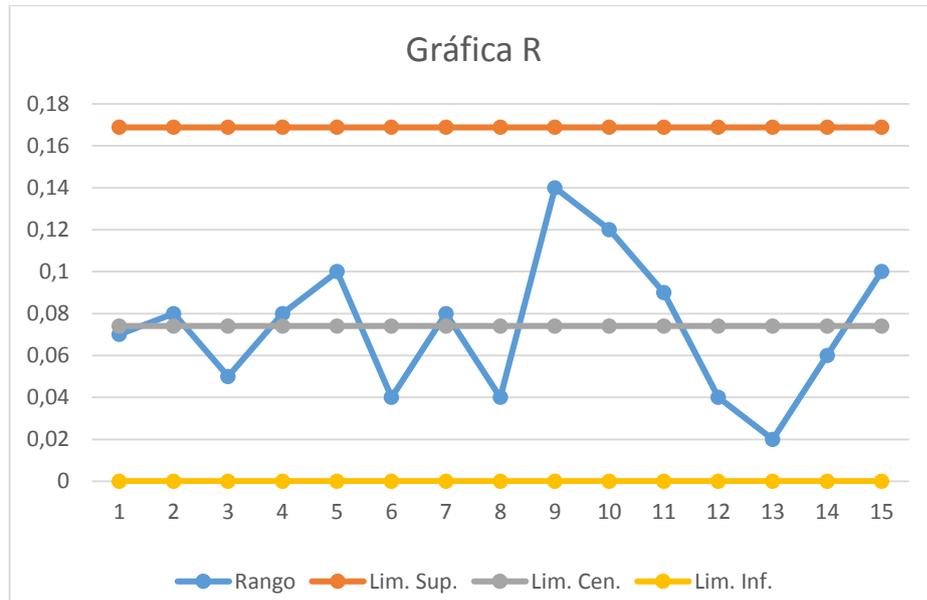
La gráfica de  $\bar{X}$  es:



**Figura 78.- Gráfica de valores promedio para eje X.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

La gráfica del rango es:



**Figura 79.- Gráfica de valores del rango para eje X.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

### 5.1.2. Carta de Control para Eje Y

Para el eje Y se toman de igual manera 15 subgrupos de 4 muestras cada una, se recorre esta vez el eje 22 mm para obtener las ranuras.



**Figura 80.- Probeta de ranuras en dirección del eje Y.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

Los datos recolectados son presentados en la Tabla 38.

**Tabla 38.**

**Medidas recolectadas de la probeta en dirección del eje Y.**

Muestra	M1	M2	M3	M4	Promedio	Rango
1	21,98	22,03	22,09	21,98	22,02	0,11
2	22,12	21,99	22,15	21,97	22,0575	0,18
3	22	22,14	22,05	21,98	22,0425	0,16
4	22,01	22	22,15	21,99	22,0375	0,16
5	22	22,02	22,15	21,94	22,0275	0,21
6	22	22,04	22,15	22	22,0475	0,15
7	22,01	21,95	22,15	22,01	22,03	0,2
8	22,03	22,05	22,15	21,97	22,05	0,18
9	21,94	22,01	22,15	22,02	22,03	0,21
10	21,99	22	22,15	22,04	22,045	0,16
11	21,98	22,03	22,15	22,04	22,05	0,17
12	22,1	22,02	22,15	22	22,0675	0,15
13	21,98	22,01	22,15	22,02	22,04	0,17
14	22	22,05	22,15	22	22,05	0,15
15	22,03	22	22,15	22	22,045	0,15
Promedio final					22,0426667	0,16733333

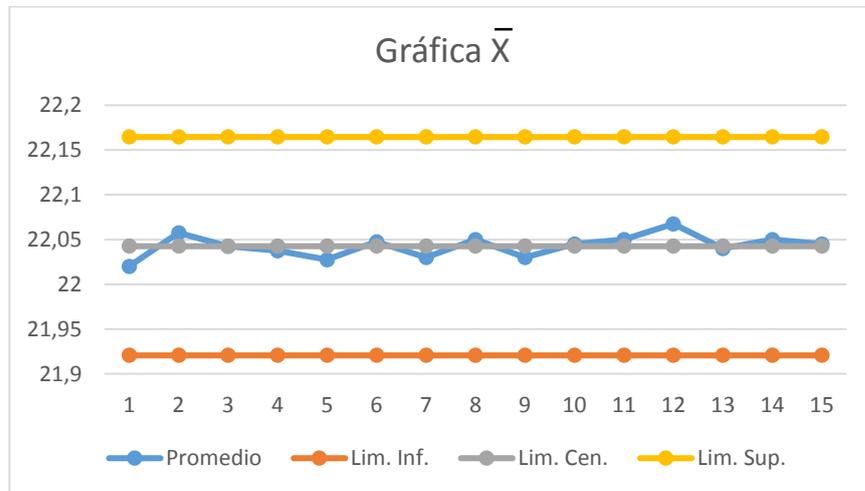
Los límites calculados para la carta de control para el eje Y se encuentran en la Tabla 39:

**Tabla 39.**

**Límites para carta de control eje Y.**

Límites	Valor
$UCL_{\bar{X}}$	22,1646527
$LCL_{\bar{X}}$	21,9206807
$UCL_R$	0,38185467
$LCL_R$	0

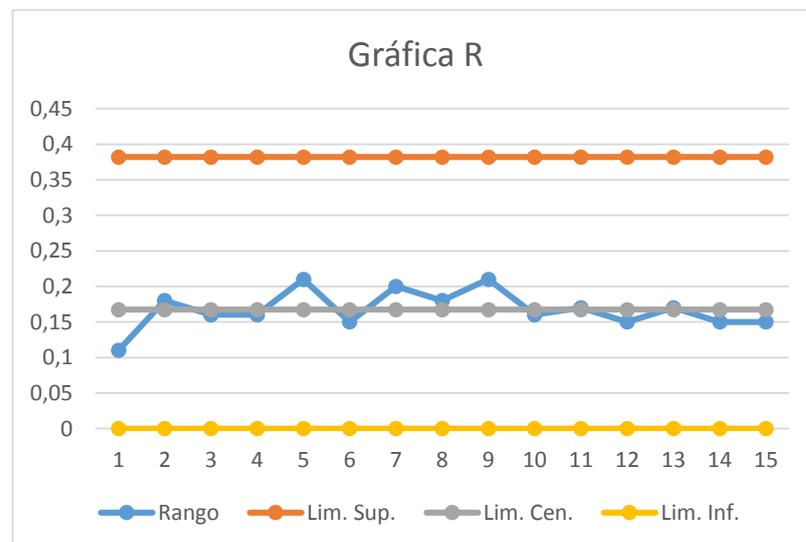
La gráfica de  $\bar{X}$  es:



**Figura 81.- Gráfica de valores promedio para eje Y.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

La gráfica del rango es:



**Figura 82.- Gráfica de valores del rango para eje Y.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

### 5.1.3. Carta de Control para Eje Z

Para el eje Z se ejecutan perforaciones a 2 mm de profundidad, 15 subgrupos de 4 muestras cada una.



**Figura 83.- Probeta de perforaciones en dirección del eje Z.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

Los datos recolectados son presentados en la Tabla 40.

**Tabla 40.**

**Medidas recolectadas de la probeta en dirección del eje Z.**

Muestra	M1	M2	M3	M4	Promedio	Rango
1	1,99	1,8	1,97	1,97	1,9325	0,19
2	1,94	1,87	2	1,93	1,935	0,13
3	1,89	1,92	2,15	1,74	1,925	0,41
4	2,04	2,18	1,64	2,01	1,9675	0,54
5	2,3	1,93	1,94	2,04	2,0525	0,37
6	1,88	2	1,91	2,08	1,9675	0,2
7	1,7	1,95	2,06	2,18	1,9725	0,48
8	2,12	2	1,75	1,97	1,96	0,37
9	1,98	2,03	2,03	1,98	2,005	0,05
10	1,81	1,99	2	2,06	1,965	0,25
11	1,85	1,97	1,93	1,92	1,9175	0,12
12	1,95	2,03	2,01	2,03	2,005	0,08
13	2	2,02	2,14	1,87	2,0075	0,27
14	2,01	2,02	2,02	2,15	2,05	0,14
15	2	1,97	1,86	1,99	1,955	0,14
Promedio final					1,9745	0,24933333

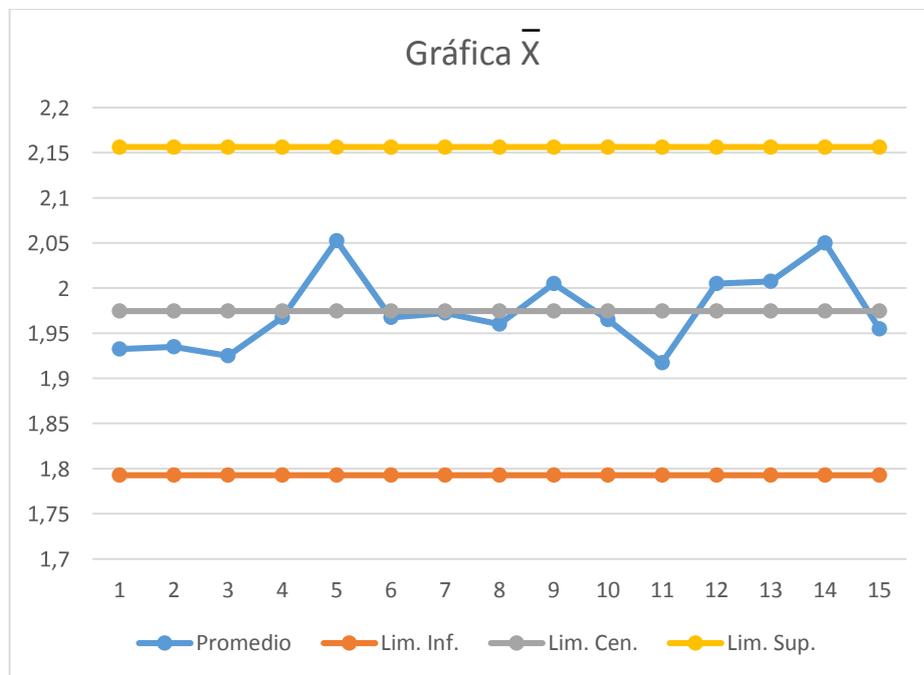
Los límites calculados para la carta de control para el eje Z se encuentran en la Tabla 41:

**Tabla 41.**

**Límites para carta de control eje Z.**

Límites	Valor
$UCL_{\bar{X}}$	2,156264
$LCL_{\bar{X}}$	1,792736
$UCL_R$	0,56897867
$LCL_R$	0

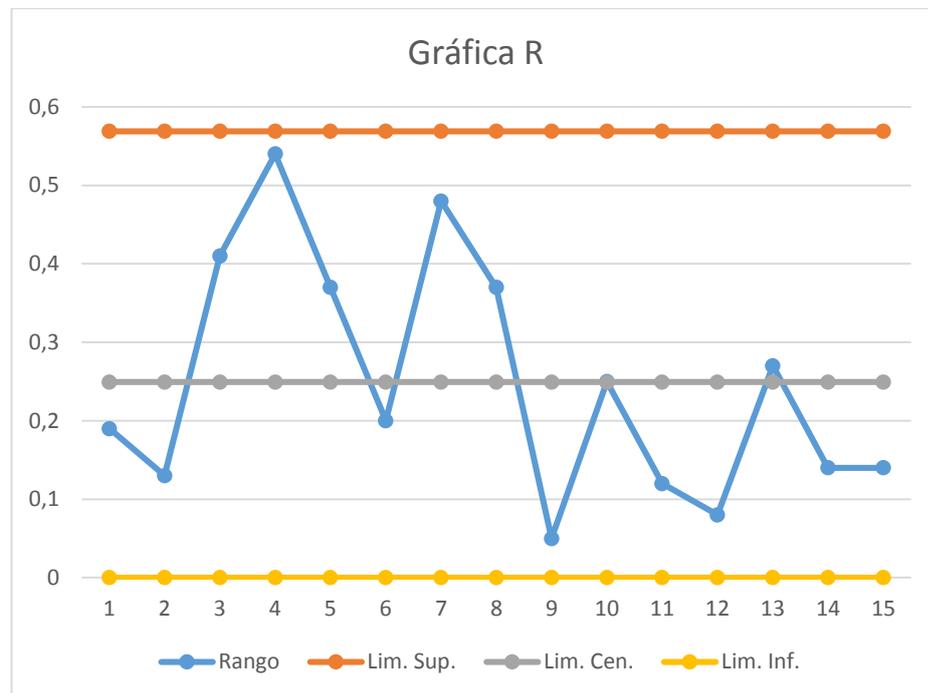
La gráfica de  $\bar{X}$  es:



**Figura 84.- Gráfica de valores promedio para eje Z.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

La gráfica del rango es:



**Figura 85.- Gráfica de valores del rango para eje Z.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

#### 5.1.4. Carta de Control para Eje A

Para el eje A se ejecutan ranuras en una superficie circular a 30°, 15 subgrupos de 4 muestras cada una.



**Figura 86.- Probeta de perforaciones en superficie circular para eje A.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

Los datos recolectados son presentados en la Tabla 42.

**Tabla 42.**

**Medidas recolectadas de la probeta en dirección del eje A.**

Muestra	M1	M2	M3	M4	Promedio	Rango
1	30,1	30,5	29,45	30,16	30,0525	1,05
2	29,98	30,2	30,65	30,18	30,2525	0,67
3	30,15	30,15	30,8	30,7	30,45	0,65
4	30,06	30,1	30,7	29,26	30,03	1,44
5	30,4	30,6	30,12	29,8	30,23	0,8
6	29,5	29,9	30,3	30,16	29,965	0,8
7	29,57	30	30,25	29,35	29,7925	0,9
8	30,64	29,8	30	30,9	30,335	1,1
9	30,9	29,45	30,8	30,5	30,4125	1,45
10	29,09	30	29,2	30,46	29,6875	1,37
11	29,1	30	29,6	30,28	29,745	1,18
12	30	29,9	29,3	29,28	29,62	0,72
13	30	30,06	30,7	29,16	29,98	1,54
14	29,8	30,07	30	30,18	30,0125	0,38
15	29,7	29,6	30,1	30,1	29,875	0,5
Promedio final					30,0293333	0,97

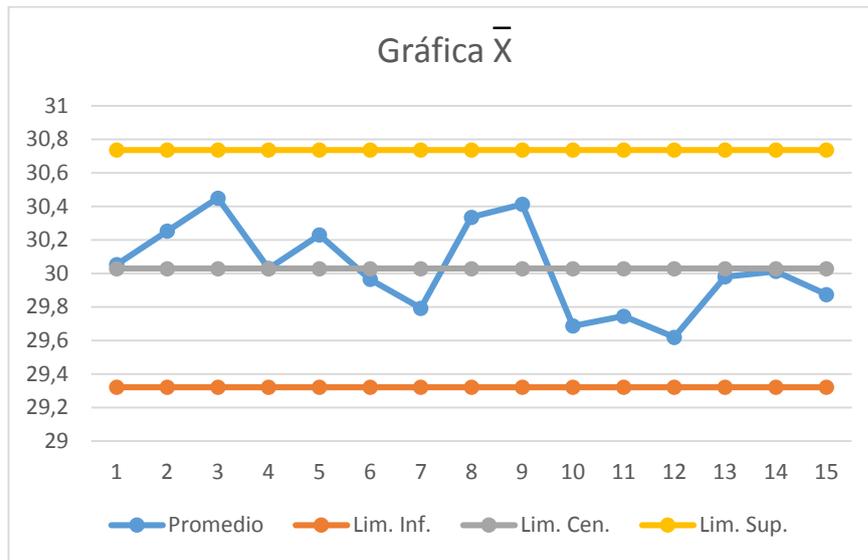
Los límites calculados para la carta de control para el eje A se encuentran en la Tabla 43:

**Tabla 43.**

**Límites para carta de control eje A.**

Límites	Valor
$UCL_{\bar{X}}$	30,7364633
$LCL_{\bar{X}}$	29,3222033
$UCL_R$	2,21354
$LCL_R$	0

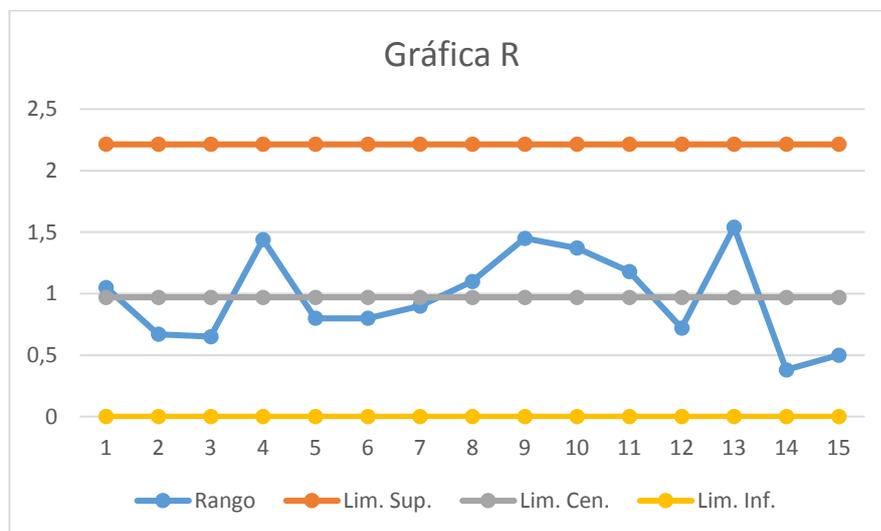
La gráfica de  $\bar{X}$  es:



**Figura 87.- Gráfica de valores promedio para eje A.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

La gráfica del rango es:



**Figura 88.- Gráfica de valores del rango para eje A.**

**Fuente: (Elaboración propia)**

En las gráficas de los ejes XYZ se puede observar que las distancias están dentro de la tolerancia de  $\pm 0,05\text{mm}$  y en el eje rotario A dentro de la tolerancia de  $\pm 0,5^\circ$ . Esto quiere decir que los ejes se mueven correctamente y están bajo control.

## CONCLUSIONES

- Se ha disminuido al máximo los costos en la construcción logrando un producto de calidad a bajo costo, las características de trabajo alcanzadas son las siguientes:

Volumen de trabajo: 874x650x170 mm (Ejes XYZ).

Precisión: +/- 0.05 mm.

Velocidad máxima de avance: 700 mm/min.

Diámetro de trabajo del cuarto eje: 140 mm.

Potencia del husillo: 2 ¼ hp.

Velocidad del husillo: 8000-24000 rpm.

Costo: 2860 dólares americanos.

Los límites de trabajo se han establecido en 850x610x160mm de manera que el usuario pueda operar la máquina de manera segura hasta que logre familiarizarse por completo, estos límites son configurables desde el software y se deja a completo criterio del usuario ampliarlos si lo cree conveniente.

- La precisión alcanzada es de +/-0.05mm como se aprecia en el capítulo de pruebas y resultados. Debido a la característica de los drivers, estos pueden ser configurados de manera que aumente el número de pulsos por cada revolución del eje, permitiendo alcanzar un mayor grado de precisión hasta 0.001mm.
- Se establece una velocidad de avance de 700mm/min, este parámetro puede ser variable según la configuración del usuario. La velocidad del husillo se varia manualmente desde la herramienta y se puede situar desde 8000 a 24000 rpm.
- Con el dimensionamiento de los componentes mecánicos y eléctricos se logró precisar los elementos que intervienen en el proceso de tallado. La implementación de un control sencillo y potente da paso a que los sistemas se integren en uno solo, de manera que el movimiento lineal realizado por cada eje sea fluido. Se garantiza de ese modo el funcionamiento apropiado de la máquina herramienta.

- El acero A 36 es una alternativa económica y eficiente en la construcción de estructuras de soporte, tiene una amplia gama de aplicación en la industria metalmecánica debido a su fácil manufactura, aporta rigidez a la maquina permitiendo alcanzar el grado de precisión requerido.
- Las posibilidades de integración de otros actuadores finales pueden proporcionar a la máquina funciones extra como el corte por láser o incluso la impresión 3D.

## RECOMENDACIONES

- Tomar en consideración los parámetros de corte adecuados que se pueden encontrar en catálogos de herramientas fácilmente por vía web. Cuanto mejor se elijan los parámetros de mecanizado, mejor será el rendimiento de la máquina. Considerar que las velocidades de avance, corte y diámetro de la herramienta demasiado grandes pueden afectar la precisión e inclusive causar daños mecánicos.
- Implementar un sistema de aspiración o limpieza, durante o después del uso. La acumulación de desperdicios causará vibraciones que disminuirán paulatinamente el rendimiento de la máquina y la vida útil de sus componentes.
- Proveer un sistema de mando a distancia en la máquina que permita verificar las operaciones y estado de cada uno de los grados de libertad. Una alternativa económica es un control de videojuegos que se puede configurar fácilmente desde KeyGrabber, una aplicación que se instala por defecto junto a Mach3.
- Existen varios portales web donde se ofrece información y descargables con respecto al correcto manejo de una máquina herramienta y uso del software Mach3. Visitar estos sitios agilizará la familiarización con el sistema previo a su utilización.

## BIBLIOGRAFÍA

- Barnes, D. (2013). *Cómo dimensionar un disyuntor*. Obtenido de [http://www.ehowenespanol.com/dimensionar-disyuntor-como\\_19753/](http://www.ehowenespanol.com/dimensionar-disyuntor-como_19753/)
- Berger Lahr. (2015). *Fórmulas, cálculos para la selección óptima de motor a pasos*.
- Calleros, H. (2012). *Tecnología de la madera*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/tecnologiadelamadera/propiedades-fisicas>
- DeskProto. (2017). Obtenido de <https://www.deskproto.com/products/newinv5.php>
- DeskProto. (2017). *3D CNC MACHINING FOR NON-MACHINISTS*. Obtenido de <https://www.deskproto.com/>
- Dewalt. (2015). *Catálogo de productos Dewalt*.
- DirectIndustry. (2017). Obtenido de <http://www.directindustry.es/prod/eichenberger-gewinde/product-13697-58015.html>
- DirectIndustry. (2017). *El salón online de la industria*. Obtenido de <http://www.directindustry.es/prod/starrag-group/product-122219-1368393.html>
- Dormer, P. (2012). *Catálogo de Información General*.
- Electrocables. (2012). *FXT - TTF - TW-F*. Obtenido de <http://electrocable.com/productos/cobre/FXT-TTF-TWF.html>
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna*.
- Hopkins, T. (2012). *AN235 Application notes stepper motor driving*.
- INEN. (2010). *Tableros, gabinetes, cajas de paso, cajas de alumbrado, racks y accesorios de rack. Requisitos*.
- ISO. (2017). *ISO 6983-1: 2009*. Obtenido de [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=34608](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=34608)
- Kollmorgen. (2013). *Motor a pasos de alto torque serie T*. Obtenido de <http://www.kollmorgen.com/en-us/products/motors/stepper/hi-torque/t-series/>
- Krar, S. F. (2009). *Tecnología de las Máquinas Herramientas*. Alfaomega.

- Larburu Arrizabalaga, N. (2010). *Máquinas prontuario. Técnicas máquinas herramientas*. Thomson Paraninfo.
- LinuxCNC. (2016). *Glade Virtual Control Panel*. Obtenido de <http://linuxcnc.org/docs/ja/html/gui/gladevcp.html>
- Longs Motor. (2011). *34HS (86BYGH 1.8°)* . Obtenido de [http://www.longsmotor.com/productinfo/detail\\_12\\_25\\_120.aspx](http://www.longsmotor.com/productinfo/detail_12_25_120.aspx)
- Lopez, A. (2013). *Cálculos sobre elección de contactores y relés térmicos*. Obtenido de <http://www.todoexpertos.com/categorias/ciencias-e-ingenieria/ingenieria-electrica/respuestas/sbu49bzw8fqbo/los-calculos-que-hago-sobre-eleccion-de-contactores-y-reles-termicos-estan-bien>
- Mecalux. (2017). *El marketplace industrial para empresas y profesionales*. Obtenido de <https://www.logismarket.es/wittenstein/sistema-lineal-mecanico-de-cremallera-y-pinon/1755692840-814692751-p.html>
- Mosquera, G. (2016). Obtenido de <https://prezi.com/sdj-wuu9n2ie/metodologia-mecatronica/>
- Newfangled Solutions. (2016). *Mach 3*. Obtenido de <http://www.machsupport.com/software/mach3/>
- Nook. (2017). *Velocidad crítica usando montajes nook*. Obtenido de [http://www.nookindustries.com/LinearLibraryItem/Crit\\_Speed\\_w\\_EZM](http://www.nookindustries.com/LinearLibraryItem/Crit_Speed_w_EZM)
- 
- Nook, I. (2012). *Helix Linear Technologies*. Obtenido de <http://www.helixlinear.com/EngineeringTool/EndFixity>
- Puertas, P., Guevara, C., & Espinoza, M. (2013). *Manual de transformación de la madera*.
- RioRand. (2017). *CNC 6 Axis DB25 Breakout Board Adapter*. Obtenido de <http://www.riorand.com/electronics/circuit-boards/riorandcnc-6-axis-db25-breakout-board-adapter-for-pc-stepper-motor-driver-mach3-kcam4-emc2-db25-cable.html>
- Sain Smart. (2016). *SainSmart 4 Axis Mach3 USB CNC Motion Controller Card*. Obtenido de <http://www.sainsmart.com/sainsmart-4-axis-mach3-usb-cnc-motion-controller-card-interface-breakout-board.html>

- SANDVIK, C. (2016). Obtenido de [http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/formulas\\_and\\_definitions/the\\_milling\\_cutter/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/formulas_and_definitions/the_milling_cutter/pages/default.aspx)
- SANDVIK, C. (2016). *Tecnología del Corte del Metal*.
- Schaeffler. (2017). *Sistemas de guiado lineal*. Obtenido de [http://www.schaeffler.es/content.schaeffler.es/es/branches/industry/food\\_packaging/products\\_food\\_packaging/linear\\_guidance/linear\\_guides.jsp](http://www.schaeffler.es/content.schaeffler.es/es/branches/industry/food_packaging/products_food_packaging/linear_guidance/linear_guides.jsp)
- Schneider Electric. (2011). *Manual de seguridad en máquinas*.
- Sinjoe Technology. (2017). *CNC Easy AC Servo Motor 1103HB*. Obtenido de [https://www.sinjoe.com/index.php?route=product/product&product\\_id=102](https://www.sinjoe.com/index.php?route=product/product&product_id=102)
- SKF. (2013). *Husillos de bolas laminados de precisión*.
- Sparber, R. (2015). *Computer numerical control for my RF-30 Mill/Drill, version 2.1*.
- Tecnopower. (2016). *Husillo de rosca trapecial*. Obtenido de <http://www.tecnopower.es/husillo-de-rosca-trapecial>
- THK. (2009). *Guías de movimiento lineal*.
- Thomson Industries. (2016). *Sistema de guía lineal roundrail con soporte continuo 1Cx*. Obtenido de [http://www.thomsonlinear.com/website/esm/esm/products/linear\\_guides/roundrail/1cx\\_continuoussupport.php#1CC](http://www.thomsonlinear.com/website/esm/esm/products/linear_guides/roundrail/1cx_continuoussupport.php#1CC)
- Toro, D. (2015). *Gráficas de control*. Obtenido de <http://normalizacionft.blogspot.com/2015/05/graficas-de-control.html>
- Ulrich, K., & Eppinger, S. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*.
- Wantmotor. (2016). *CNC Stepper Motor Driver 6 Axis Interface Board*.
- Xinling Electrical. (2017). *Interruptores fin de carrera / Interruptores Micro*. Obtenido de [http://es.made-in-china.com/co\\_clinelectrical/product\\_Limit-Switches-Micro-Switches-Position-Switch-AZ-7121-\\_hognssieg.html](http://es.made-in-china.com/co_clinelectrical/product_Limit-Switches-Micro-Switches-Position-Switch-AZ-7121-_hognssieg.html)

# **ANEXOS**

**ANEXO 1**

**Velocidad de corte (Vc) y avance por diente (fz) para aluminio. (Krar, 2009)**

**ANEXO 2**

**Fuerza de corte específica para un espesor medio de la viruta de 1mm (kc1) y factor de compensación del grosor de la viruta (mc) para aluminio. (Dormer, 2012)**

**ANEXO 3****Velocidad de corte (Vc) y avance por revolución (fn) para aluminio.****(Larburu Arrizabalaga, 2010)**

**ANEXO 4****Medidas normalizadas para husillos de bolas de diferentes diámetros.****(SKF, 2013)**

**ANEXO 5**  
**Planos Mecánicos**

**ANEXO 6**

**Plano Eléctrico – Electrónico**

**ANEXO 7**

**Diagrama de Procesos de la Construcción**