



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**EXTENSIÓN LATACUNGA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE  
CENTRO DE MECANIZADO VERTICAL CNC DE 5 EJES  
PARA EL LABORATORIO CNC DE LA ESPE EXTENSIÓN  
LATACUNGA.”**

**BUSTILLOS ESCOLA DIEGO ISRAEL**

**COQUE LARCOS KLEVER RAUL**

Tesis presentada como requisito previo a la obtención del título de:

**“INGENIERO EN MECATRÓNICA”**

**2014**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE  
EXTENSIÓN LATACUNGA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

NOSOTROS, BUSTILLOS ESCOLA DIEGO ISRAEL  
COQUE LARCOS KLEVER RAUL

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado **“Diseño y construcción de un prototipo de centro de mecanizado vertical CNC de 5 ejes para el laboratorio CNC de la ESPE Extensión Latacunga.”** ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan manteniendo normas APA, y cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Latacunga, Febrero del 2014.

---

BUSTILLOS ESCOLA DIEGO ISRAEL

---

COQUE LARCOS KLEVER RAUL

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE  
EXTENSIÓN LATACUNGA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**CERTIFICADO**

ING. FAUSTO ACUÑA (DIRECTOR)

ING. FRANKLIN SILVA (CODIRECTOR)

**CERTIFICAN**

Que el trabajo titulado “**Diseño Y Construcción de un prototipo de centro de mecanizado vertical CNC de 5 ejes para el Laboratorio CNC de la ESPE Extensión Latacunga.**” realizado por los señores: BUSTILLOS ESCOLA DIEGO ISRAEL y COQUE LARCOS KLEVER RAUL; ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

Latacunga, Febrero del 2014.

---

ING. FAUSTO ACUÑA

DIRECTOR

---

ING. FRANKLIN SILVA

CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

## **AUTORIZACIÓN**

NOSOTROS, BUSTILLOS ESCOLA DIEGO ISRAEL  
COQUE LARCOS KLEVER RAUL

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo **“Diseño y construcción de un prototipo de centro de mecanizado vertical CNC de 5 ejes para el Laboratorio CNC de la ESPE Extensión Latacunga.”** cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Latacunga, Febrero del 2014.

---

BUSTILLOS ESCOLA DIEGO ISRAEL

---

COQUE LARCOS KLEVER RAUL

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto va dedicado con todo mi corazón a mi padre Javier y mi madre Anita; a mi hermano Angel, mi hermana Anahí; a mi enamorada Noemi, mis amigos Mario y Gustavo por su infinito cariño y sobretodo paciencia, quienes han sido los pilares fundamentales de mi vida. Los amo mucho que mi Dios siempre me los guarde y bendiga.

***DIEGO BUSTILLOS***

Con todo mi cariño y mi amor para las personas que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento a mi madre Alicia Enriqueta y mi padre Hector Raul. Como olvidar también a esas personas importantes en mi vida, que siempre estuvieron listas para brindarme toda su ayuda, ahora me toca regresar un poquito de todo lo inmenso que me han otorgado, con todo mi cariño está tesis se las dedico a ustedes: Alexandra, Julio, Lorena, Sandra, Diana.

***KLEVER COQUE***

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos el logro de este proyecto a todas las personas que nos apoyaron a lo largo de nuestra vida politécnica por todas las vivencias y momentos compartidos por eso y mucho más a: Andrés, Walter, Diego F., Mauricio, Alex, Julio, Alvaro.

**GRACIAS**

## ÍNDICE

PORTADA.....	i
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....	ii
CERTIFICADO.....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICE.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xvi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
PRESENTACIÓN.....	3
CAPÍTULO I.....	4
GENERALIDADES .....	4
1.1 FRESADORA VERTICAL DE 5 EJES CNC.....	4
1.1.1. Introducción .....	4
a. Centro de mecanizado vertical con quinto eje “A”.....	5
b. Centro de mecanizado vertical con quinto eje B. ....	5
c. Centro de mecanizado vertical cabezal BA. ....	6
1.1.2. Principio de funcionamiento.....	7
1.1.3. Ventajas y desventajas del mecanizado con 5 ejes.....	8
1.1.4. Prototipo de fresadora de 3 ejes CNC. ....	8
1.1.5. Prototipos de fresadoras de 5 ejes CNC.....	9

1.1.6.	Herramientas de fresado para 5 ejes.....	12
1.1.7.	Herramientas de sujeción para fresadoras de 5 ejes CNC.....	13
1.1.8.	Operaciones de fresado vertical. ....	13
a.	Planeado.....	14
b.	Ranurado recto. ....	14
c.	Fresado frontal.....	15
d.	Taladrado.....	15
1.1.9.	Parámetros de corte en el fresado.....	16
1.2	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	18
1.2.1.	Propiedades mecánicas del aluminio.....	18
1.2.2.	Propiedades mecánicas de los aceros. ....	19
1.3	SISTEMAS DE CONTROL.....	20
1.3.1.	Sistemas de control de lazo abierto.....	21
1.3.2.	Sistema de control de lazo cerrado.....	22
1.3.3.	Precisión, repetibilidad y resolución.....	23
1.4	ACTUADORES ELÉCTRICOS, ELEMENTOS DE CONTROL.....	24
1.4.1.	Actuadores eléctricos.....	24
a.	Motores eléctricos.....	24
b.	Servomotor. ....	25
c.	Motores a pasos. ....	26
1.4.2.	Elementos de control. ....	26
a.	Interruptores.....	26
b.	Relé .....	27



c.	Sensores.....	27
d.	Sensores de posicionamiento angular.....	29
1.5	NORMAS DE SEGURIDAD PARA EL TRABAJO CON MÁQUINAS HERRAMIENTAS.....	31
1.5.1.	Recomendaciones generales.....	31
1.5.2.	Seguridad antes del mecanizado.....	32
1.5.3.	Seguridad durante el mecanizado. ....	32
	CAPÍTULO II.....	33
	DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO DEL PROTOTIPO DE CENTRO DE MECANIZADO VERTICAL DE 5 EJES CNC.....	33
2.1	PARÁMETROS GENERALES DE DISEÑO.....	33
a.	Recorrido de los ejes. ....	33
b.	Dimensiones del material a mecanizar. ....	34
c.	Fuerza de corte.....	34
d.	Cargas estáticas sobre los ejes. ....	34
e.	Velocidad de giro de la herramienta. ....	37
f.	Potencia de corte.....	38
2.2	SISTEMA MECÁNICO DEL PROTOTIPO DE FRESADORA VERTICAL DE 5 EJES CNC.....	38
2.2.1.	Descripción del sistema mecánico para el movimiento del eje principal “Y”. ....	39
2.2.2.	Descripción del sistema mecánico para el movimiento del eje principal “X”.....	39
2.2.3.	Diseño del sistema mecánico para el movimiento del eje principal “Z”.....	40

a.	Cálculo del Sistema de Guías.....	40
b.	Cálculo del husillo roscado de bolas eje “Z”. .....	45
c.	Cálculo del torque para la estructura del eje “Z”. .....	47
2.2.4.	Diseño del sistema mecánico para el movimiento del eje rotativo A.....	51
a.	Cálculo de la estructura del eje “A” (Cuna) .....	51
b.	Cálculo de la transmisión de movimiento rotativo sin fin – corona para el eje “A”. .....	52
2.2.5.	Diseño del sistema mecánico para el movimiento del eje rotativo C. ....	54
a.	Cálculo de la transmisión de movimiento rotativo sin fin – corona para el eje “C”. .....	55
2.2.6.	Descripción del sistema mecánico cabezal fresador. ....	56
2.2.7.	Acople entre actuadores y mecanismos de transmisión. ....	57
2.3	DESCRIPCIÓN DE LOS MOTORES PARA EL PROTOTIPO.....	57
2.4	DESCRIPCIÓN DEL MOTOR PARA EL HUSILLO DEL CABEZAL.....	58
CAPÍTULO III.....		59
DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL PROTOTIPO DE FRESADORA VERTICAL DE 5 EJES. ....		59
3.1	PARÁMETROS DE DISEÑO PARA EL SISTEMA DE CONTROL DEL PROTOTIPO DE FRESADORA VERTICAL DE 5 EJES CNC.....	60
3.1.1.	Parámetros de diseño y selección de los elementos del sistema electrónico de control.....	61
a.	Tarjetas CNC. ....	61

b.	Drivers de control para motores a pasos. ....	65
c.	Tarjeta controladora de velocidad del motor DC. ....	68
d.	Circuito acondicionador de voltaje. ....	69
3.1.2.	Parámetros de diseño y selección de los elementos del sistema eléctrico de control. ....	69
3.1.3.	Parámetros de diseño y selección del software de control. ....	75
3.1.4.	Parámetros de diseño y selección del HMI. ....	75
3.1.5.	Descripción del sistema de comunicación. ....	77
CAPÍTULO IV. ....		78
IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA. ....		78
4.1	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO. ....	78
4.1.1.	Implementación de la estructura de los ejes. ....	78
a.	Implementación de la estructura del eje “X”. ....	78
b.	Implementación de la estructura del eje “Y”. ....	79
c.	Implementación de la estructura del eje “Z”. ....	80
d.	Implementación de la estructura del eje “A”. ....	81
e.	Implementación de la estructura del eje “C”. ....	82
4.1.2.	Implementación del sistema mecánico de movimiento a la estructura principal. ....	83
4.2	IMPLEMENTACIÓN DEL LOS SISTEMAS DE CONTROL. ....	84
4.2.1.	Finales de carrera. ....	84
4.2.2.	Placas del HOME con sensores tipo herradura. ....	85
4.2.3.	Caja principal de control para el sistema automático de la fresadora vertical de 5 ejes CNC. ....	86
4.2.4.	Configuración del Mach3. ....	88

a.	Configuración de unidades nativas.....	90
b.	Configuración de puertos y pines.....	90
c.	Sintonización de motores (Motor Tuning). ....	95
d.	Configuración de los límites por software (SoftLimits) .....	99
4.2.5.	Controles del programa Mach3.....	100
4.2.6.	Ingresar un programa de códigos G en Mach3.....	102
4.2.7.	Interfaz de comunicación hacia el sistema de control.....	103
4.3	FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA MECÁNICO Y DE CONTROL.....	104
4.3.1.	Calibración de las tarjetas de control de los motores.....	105
4.3.2.	Desplazamiento de los carros a lo largo de las coordenadas X, Y, Z, A, C. ....	105
4.3.3.	Encendido del husillo.....	105
4.4	Enlace CAD/CAM.....	106
4.5	FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DEL PROTOTIPO DE FRESADORA VERTICAL CNC DE 5 EJES.....	107
4.5.1.	Cero absoluto o referencia de la fresadora.....	107
4.5.2.	Mecanizado como fresadora de 3 ejes. ....	108
a.	Referencia de la pieza para fresado. ....	109
b.	Mecanizado de la pieza para fresadora de 3 ejes.....	109
4.5.3.	Mecanizado como fresadora de 5 ejes. ....	110
a.	Referencia de la pieza para fresado secuencial en 5 ejes. ....	110
b.	Mecanizado de la pieza para fresadora posicional de 5 ejes. ....	111

4.6	PRUEBAS, RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS. ...	112
4.7.1.	Pruebas de corriente en los motores a paso. ....	112
4.7.2.	Pruebas de velocidad del husillo.....	113
4.7.3.	Pruebas para el fresado posicional en 4 ejes. ....	113
4.7.4.	Pruebas de taladrado posicional en 5 ejes. ....	114
4.7.5.	Pruebas de fresado simultáneo en 5 ejes.....	115
4.7.6.	Resultados y análisis de resultados.....	116
a.	Resultados y análisis de resultados de pruebas de corriente en los motores a pasos. ....	116
b.	Resultado y análisis de resultados en las pruebas de velocidad.....	117
c.	Cálculo de la resolución de la máquina. ....	119
d.	Cálculo de la precisión de la máquina. ....	120
e.	Resultados y análisis de resultados para el fresado posicional de 4 ejes. ....	121
f.	Resultados y análisis del taladrado posicional en 5 ejes. ...	125
g.	Resultados y análisis de resultados del fresado secuencial con 5 ejes.....	126
4.7	MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.....	127
4.8	ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO. ....	127
4.9	VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS. ....	128
	CAPÍTULO V.....	130
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	130
5.1	CONCLUSIONES:.....	130
5.2	RECOMENDACIONES: .....	131
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133

GLOSARIO .....	138
ANEXOS.....	139
ÌNDICE DE ANEXOS.....	140

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.1 Valores de presión específica de corte para materiales blandos.....	18
Tabla 1.2. Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas del acero. ....	20
Tabla 2.1. Valores de masa de las estructuras de los ejes.....	35
Tabla 2.2: Características técnicas del motores a pasos.....	57
Tabla 3.1 Características de diferentes tarjetas CNC .....	62
Tabla 3.2 Terminales de conexión de la tarjeta combo board rev. 5.....	64
Tabla 3.3. Terminales de conexión de la tarjeta CNC-DB25 .....	65
Tabla 3.4 Terminales tarjeta LM-1HP .....	68
Tabla 3.6 Características de elementos eléctricos .....	72
Tabla 3.7 Características de elementos eléctricos .....	73
Tabla. 4.1: Terminales de la tarjeta geckodriver 202. ....	87
Tabla 4.2. Ajuste de corriente. ....	88
Tabla 4.3: Distribución de pines del adaptador.....	104
Tabla 4.4: Valores de corriente vs penetración.....	116
Tabla 4.5: Velocidad del husillo en velocidad baja.....	117
Tabla 4.6: Velocidad del husillo en velocidad alta.....	118
Tabla 4.7: Muestras del fresado.....	121
Tabla 4.8: Muestras de él ciclo de taladrado. ....	125
Tabla 4.9: Datos de las mediciones tomadas .....	126
Tabla 4.10: Lista de materiales y precios.....	128





Figura 1.24: Sensor infrarrojo. ....	28
Figura 1.25: Potenciómetro.....	29
Figura 1.26: Encoder incremental. ....	30
Figura 1.27: Encoder absoluto .....	30
Figura 1.28: Protección personal .....	31
Figura 2.1: Prototipo fresadora vertical de 3 ejes CNC.....	38
Figura 2.2: Mecanismo de movimiento del eje “Y” .....	39
Figura 2.3: Mecanismo de movimiento del eje “X” .....	39
Figura 2.4: Mecanismo de movimiento del eje “Z” .....	40
Figura 2.5: Esquema de fuerzas para el sistema de guías .....	41
Figura 2.6: Esquema de fuerzas y momentos para los ejes guías.....	42
Figura 2.7: Escala de tensiones según el criterio de Von Mises. ....	44
Figura 2.8: Esquema de fuerzas y momentos para el husillo de bolas del eje “Z” .....	46
Figura 2.9: Fuerzas e Inercias en un ejemplo de mesa de mecanizado. .	47
Figura 2.10: Mecanismo de movimiento del eje “A” .....	51
Figura 2.11: Escala de tensiones según el criterio de Von Mises. ....	52
Figura 2.12: Fuerza puntual en el eje “A” .....	53
Figura 2.13: Mecanismo de movimiento del eje “A” .....	55
Figura 2.14: Mecanismo del cabezal fresador .....	56
Figura 3.1: Esquema general del control .....	59
Figura 3.2: Diagrama de bloques de las tarjeta controladoras.....	61
Figura 3.3: Vista superior de la tarjeta combo board rev. 5. ....	63
Figura 3.4: Vista superior de la tarjeta CNC-DB25 .....	64
Figura 3.5: Tarjeta Gecko Drive G202 .....	66

Figura 3.6: Tarjeta KL-4030 .....	67
Figura 3.7: Tarjeta LM-1hp control de PWM .....	68
Figura 3.8: Circuito acondicionador de voltaje. ....	69
Figura 3.9: Calibre AWG para cable de cobre. ....	73
Figura 3.10: Conexión de la tarjeta driver al motor a pasos.....	74
Figura 3.11: Conexión de la fuente 4 al driver KL-4030.....	74
Figura 3.12: Puertos del conector DB-25.....	77
Figura 4.1: Implementación del diseño mecánico. ....	78
Figura 4.2: Montaje de la estructura del eje "X". ....	79
Figura 4.3: Montaje de la estructura del eje "Y". ....	80
Figura 4.4: Montaje de la estructura del eje "Z". ....	81
Figura 4.5: Montaje de la estructura del eje "A". ....	82
Figura 4.6: Montaje de la estructura del eje "C". ....	83
Figura 4.7: Implementación del sistema mecánico. ....	84
Figura 4.8: Switch limitador de carrera. ....	85
Figura 4.9: Sensores tipo herradura. ....	85
Figura 4.10: Caja de control, parte interna y externa.....	86
Figura 4.11: Perfil de la fresadora de 5 ejes .....	89
Figura 4.12: Opciones de configuración. ....	89
Figura 4.13: Selección del sistema de unidades.....	90
Figura 4.14: Configuración de puertos y ejes. ....	91
Figura 4.15: Configuración de salidas a los ejes en el Mach3. ....	92
Figura 4.16: Configuración de los switch en el Mach3.....	93
Figura 4.17: Configuración del paro de emergencia en el Mach3.....	93
Figura 4.18: Configuración de las salidas a relé en el Mach3.....	94

Figura 4.19: Configuración de salidas a relés y spindle en el Mach3. ....	94
Figura 4.20: Sintonización de los motores para los ejes X, Y, Z. ....	97
Figura 4.21: Sintonización de los motores para los ejes A, C. ....	98
Figura 4.22: Sintonización del motor para el mandril. ....	99
Figura 4.23: Configuración de la referencia de operación. ....	100
Figura 4.24: Controles de la pantalla principal. ....	100
Figura 4.25: Pantalla de visualización de los códigos G. ....	101
Figura 4.26: Pantalla de posición de la herramienta. ....	101
Figura 4.27: Formas de ingresar códigos G. ....	102
Figura 4.28: Formas de ingresar un programa de códigos G. ....	103
Figura 4.29: Encendido del husillo. ....	105
Figura 4.30: CAD en SolidWorks. ....	106
Figura 4.31: CAM en MasterCamX6. ....	106
Figura 4.32: Códigos G. ....	107
Figura 4.33: Punto de referencia o cero absoluto. ....	108
Figura 4.34: Diseño de la pieza de fresado en SolidWorks. ....	108
Figura 4.35: Cero pieza para el fresado. ....	109
Figura 4.36: Mecanizado en fresadora de 3 ejes. ....	109
Figura 4.37: Pieza de fresado. ....	110
Figura 4.38: Cero pieza en Z. ....	110
Figura 4.39: Cero pieza en X, Y. ....	111
Figura 4.40: Mecanizado en fresadora de 5 ejes. ....	112
Figura 4.41: Corriente en el eje "Z". ....	112
Figura 4.42: Pruebas de velocidad del husillo. ....	113
Figura 4.43: Toma de muestras en el fresado. ....	114

Figura 4.44: Dimensiones del ciclo de taladrado. ....	115
Figura 4.45: Medidas tomadas con el reloj comparador. ....	115
Figura 4.46: Corriente Vs Penetración. ....	116
Figura 4.47: Velocidad del husillo. ....	118
Figura 4.48: Velocidad del husillo. ....	119
Figura 4.49: Medición lado 1. ....	122
Figura 4.50: Medición lado 2. ....	122
Figura 4.51: Medición lado 3. ....	123
Figura 4.52: Medición lado 4. ....	123
Figura 4.53: Medición lado 5. ....	124
Figura 4.54: Medición lado 6. ....	124
Figura 4.55: Medición de 0° a 360°. ....	125
Figura 4.56: Mediciones de 0° a 90°. ....	127

## RESUMEN

La automatización de máquinas herramientas de control numérico computarizado (CNC) ha alcanzado una gran importancia en la industria de manufactura flexible, brindando optimización de tiempo y disminución de errores en la producción por falla humana.

La presente tesis consiste en el “Diseño y construcción de un prototipo de centro de mecanizado vertical CNC de 5 ejes para el laboratorio CNC de la ESPE Extensión Latacunga.”, partiendo de un prototipo de fresadora vertical de tres ejes construida como proyecto de investigación.

El prototipo propuesto, para el laboratorio CNC, trata de implementar un cuarto eje rotativo “A” sobre el eje “X” y un quinto eje rotativo “C” sobre el eje “Z” según la norma DIN 66217, así como también la sustitución de la transmisión piñón-cremallera del eje “Z” por una de tuerca-husillo de bolas, para el mecanizado de superficies complejas.

El control de la máquina se lo realizó por software, mediante una interfaz HMI (Humano-Máquina), para la lectura e interpretación de códigos ISO o denominado lenguaje de programación “G”; para el control de velocidad, aceleración y posición de los 5 ejes se utilizó motores a pasos y sus controladores colocados uno por cada eje; la comunicación se lo realizó mediante dos puertos paralelos LPT1 y LPT2 con conectores DB-25 según la norma RS232.

Su funcionamiento se basa en la técnica CAD/CAM que consiste en dibujar la pieza a mecanizar mediante software CAD y luego programar la trayectoria de la herramienta con software CAM, para finalmente simular y mecanizar, todo ello en forma automática.

## **ABSTRACT**

The automation of numerical control computerized machine tools (CNC) has reached a great importance in the flexible manufacturing industry, providing time optimization and reduction of errors in production by human failure.

The present work consisting of "Design and construction of a prototype vertical machining center CNC 5 axis for CNC's lab at the Army Forces university- ESPE campus Latacunga", based on a prototype of three-axis vertical milling machine built as a research project.

The prototype proposed for the laboratory CNC is implementing a fourth rotary axis "A" on the "X" axis rotary axis and a fifth " C" on the "Z " axis according to DIN 66217 as well as the replacement the rack and pinion transmission axis "Z " for a nut - ball screw machining of complex surfaces.

The machine control is done through the software interface with HMI (Human- Machine) for the reading and interpretation of ISO codes called programming language. To control the speed, acceleration and position of the 5-axis step motors are used drivers placed one on each axis, communication is done through two parallel ports LPT1 and LPT2 with DB-25 connectors.

It is operation is based on the CAD/CAM technique of drawing the work piece by CAD software and then programs the tool path using CAM software to simulate and finally all in machining automatically.

## **PRESENTACIÓN**

En el presente proyecto se desarrolla un prototipo de fresadora vertical de 5 ejes de control numérico computarizado, el cual permite mecanizar piezas de superficies complejas a pequeña escala para el laboratorio CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

El Capítulo I contiene información referente a máquinas y prototipos de máquinas de control numérico computarizado, es decir los recursos y materiales existentes que se disponen para realizar la parte mecánica y la de control; información necesaria para el desarrollo del proyecto.

El Capítulo II detalla el diseño y la selección de los elementos mecánicos de un prototipo de fresadora vertical de 5 ejes conjuntamente con la selección de mecanismos de movimiento de cada eje, para un adecuado funcionamiento en el proceso de mecanizado.

El Capítulo III detalla el diseño de control del prototipo, donde se determinan sus parámetros y la selección de los elementos de control para cumplir las funciones determinadas.

El Capítulo IV consta de la implementación de los sistemas mecánicos y de control para proceder a realizar pruebas de funcionamiento, además se muestra parámetros de resolución y precisión de la máquina.

Las conclusiones y recomendaciones del proyecto se detallan en el Capítulo V, las cuales permitirán realizar proyectos futuros a gran escala.

Se incluye anexos y referencias bibliográficas para profundizar en el tema.

# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES

### 1.1 FRESADORA VERTICAL DE 5 EJES CNC.

#### 1.1.1. Introducción

En una máquina fresadora vertical de cinco ejes, además del movimiento relativo entre pieza y herramienta en tres ejes, se puede controlar o bien el giro de la pieza sobre dos ejes, uno perpendicular al eje de la herramienta y otro paralelo a ella (como con un mecanismo divisor y un plato giratorio en una fresadora vertical); o bien el giro de la pieza sobre un eje horizontal y la inclinación de la herramienta alrededor de un eje perpendicular al anterior. Se utilizan para generar formas complejas, como el rodete de una turbina Francis (Karlo, 2008, pág. 10)

Se utiliza para la producción en serie y con gran precisión porque la computadora que lleva incorporada controla la ejecución de la pieza (figura 1.1).



**Figura 1.1: Fresadora vertical CNC de 5 ejes**

FUENTE: (SEMAPRE, 2012)

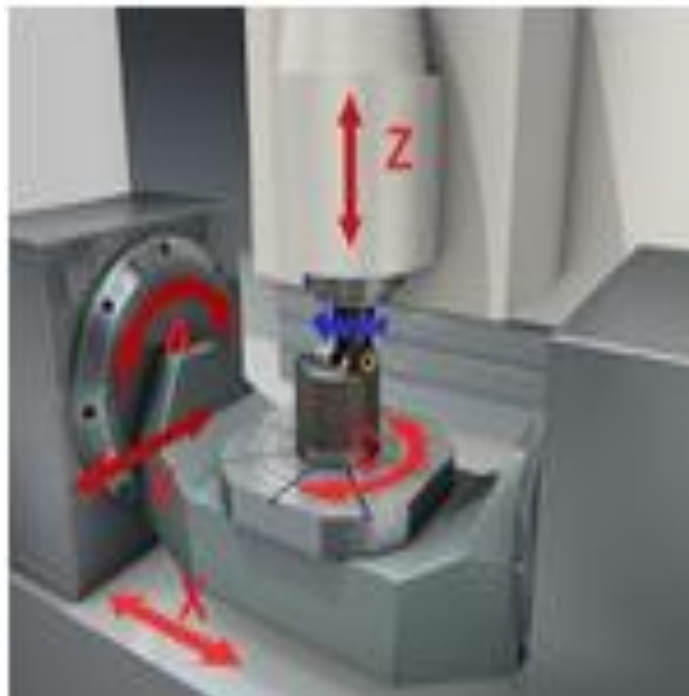
Las máquinas herramientas se dividen de acuerdo a la orientación del husillo y a su número de ejes, que pueden ser de 3, 4 y 5 ejes. Se hará



referencia únicamente a las fresadoras de 5 ejes, cuyos tipos existentes son:

**a. Centro de mecanizado vertical con quinto eje “A”.**

En este tipo de fresadora se observa (figura 1.2) que la mesa giratoria o cuarto eje denominado A, se encuentra ubicado en el eje principal “X”, mientras que un quinto eje denominado C, se encuentra ubicado en los ejes X,Y y es perpendicular al husillo.

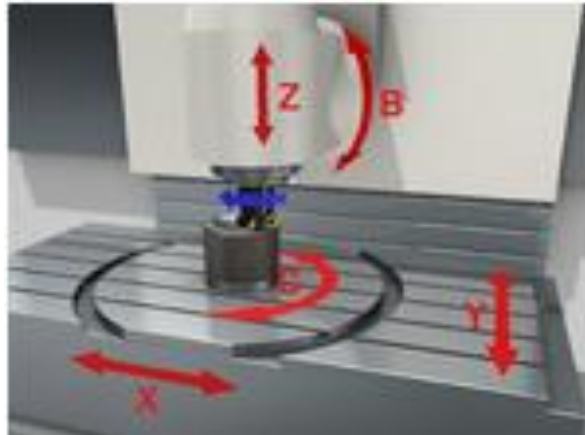


**Figura 1.2: Centro de mecanizado vertical con quinto eje “A”.**

FUENTE: (SANDIVIK, 2011)

**b. Centro de mecanizado vertical con quinto eje B.**

Esta fresadora cuenta con una mesa giratoria o cuarto eje denominado A, que se encuentra ubicado en el eje principal “X”, mientras que un quinto eje denominado B, hace girar al husillo alrededor del material para conseguir el mecanizado con los 5 ejes de movimiento, esto se puede observar en la figura 1.3.

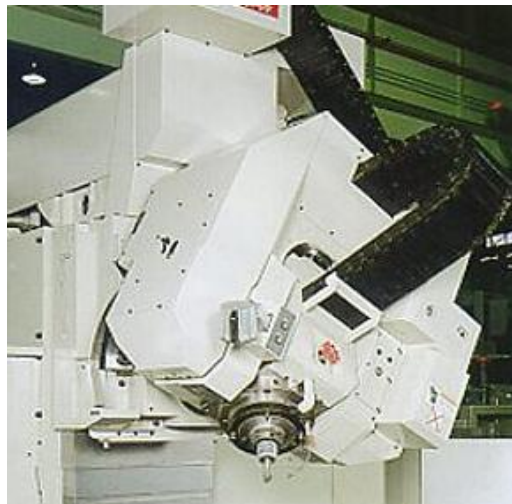


**Figura 1.3: Centro de mecanizado vertical con quinto eje B**

FUENTE: (SANDIVIK, 2011)

**c. Centro de mecanizado vertical cabezal BA.**

Este tipo de máquina cuenta con el cuarto y quinto eje montados en el husillo, donde el eje rotatorio B gira alrededor del eje "Y", mientras que el eje "A" gira alrededor del eje "X" como se muestra en la figura 1.4.



**Figura 1.4: Centro de mecanizado vertical cabeza BA.**

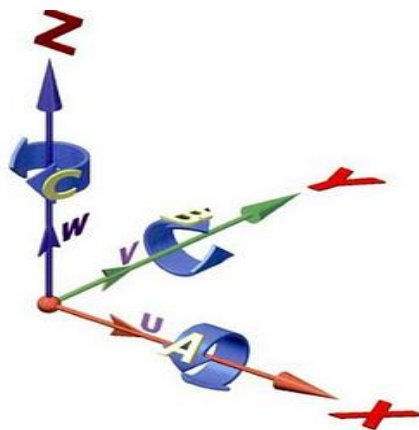
FUENTE: (Hagiz, 2007)

Estas máquinas son robustas mecánicamente y similares a un brazo robótico por lo cual realizar prototipos de las mismas no es viable.

### 1.1.2. Principio de funcionamiento.

Los ejes lineales X Y Z pueden desplazarse simultáneamente con los ejes rotacionales A y C o a su vez en forma posicional, gracias a ello se obtiene resultados de mecanizados de piezas complejas, permitiendo así realizar elementos de precisión con la facilidad que representa cambiar de un modelo de pieza a otro mediante la inserción del programa correspondiente. El equipo de control numérico se controla mediante un programa que utiliza números, letras y otros símbolos, por ejemplo, los llamados códigos G (movimientos y ciclos fijos) y M (funciones auxiliares), están codificados en un formato apropiado para definir un programa de instrucciones para el desarrollo de una tarea concreta. Cuando la tarea en cuestión varia se cambia el programa de instrucciones. La máquina opera a velocidades de corte y avance muy superiores a las fresadoras convencionales por lo que se utilizan herramientas de metal duro para disminuir la fatiga de materiales (Gordón, 2013, pág. 5).

El recorrido de los nueve ejes, movimientos principales y rotativos están sujetos a un estándar industrial, la notación utilizada para los ejes y su dirección en máquinas herramientas es como se muestra en la figura 1.5.



**Figura 1.5: Notación de los ejes y dirección de movimiento en máquinas herramientas.**

FUENTE: (Karlo, 2008, pág. 15)

En donde:

- **X e Y:** Movimientos principales de avance en el plano de trabajo principal.
- **Z:** Eje paralelo al eje principal de la máquina, perpendicular al plano principal X, Y.
- **U, V, W:** Ejes auxiliares paralelos a X, Y, Z respectivamente.
- **A, B, C:** Ejes rotativos sobre cada uno de los ejes X, Y, Z.

### **1.1.3. Ventajas y desventajas del mecanizado con 5 ejes**

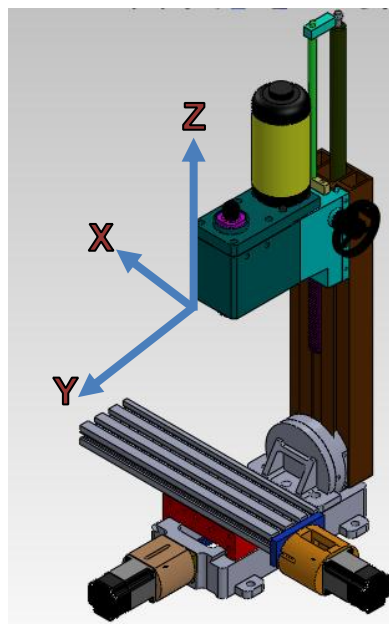
Entre las principales ventajas del mecanizado con cinco ejes de movimiento tenemos: el mecanizado de piezas con curvas complejas, mecanizado de curvas internas, reducción del tiempo de mecanizado, mecanizado posicional o simultáneo. Las desventajas son: reducción de la velocidad de avance para el mecanizado. Disminución del área de trabajo, compleja programación, cuando se trata de prototipos aumento de vibración que es directamente proporcional a la robustez de los ejes rotativos, y compleja implementación de un cambio automático de herramientas.

De preferencia se debe programar para realizar un mecanizado posicional en el cual la máquina fresa de cara en cara al elemento mecánico, y cuando se programa de manera secuencial es decir los cinco ejes a la vez o en grupos de tres ejes se tiene vibración excesiva, reducción de precisión y excesivo tiempo de mecanizado.

### **1.1.4. Prototipo de fresadora de 3 ejes CNC.**

Este prototipo fue realizado en la Escuela Politécnica del Ejército extensión Latacunga, cuya estructura mecánica cuenta con: un sistema de movimiento lineal a base de guías cola de milano para los tres ejes X, Y, Z. La transmisión de movimiento para los ejes X, Y está dado por husillo de bolas – tuerca, mientras que para el eje “Z” se utiliza un sistema

piñón cremallera. El movimiento de los ejes se lo realiza por medio de motores a pasos de la marca QuickSilver modelo A23-3. El acople entre actuador y la transmisión es un acople flexible de quijadas. El movimiento para el giro de la herramienta es realizado por un motor DC CHUNG HSIWCO.LTDA, acoplado a un sistema de transmisión por engranajes (ver figura 1.6).



**Figura 1.6: Prototipo de fresadora vertical de 3 ejes CNC.**

El sistema de control utilizado por esta máquina consta de: software de control Mach3, una tarjeta controladora Combo-board rev.5 y drivers de control de motores GeckoDriver G202, para el control de velocidad del husillo se utiliza una tarjeta LM-1hp.

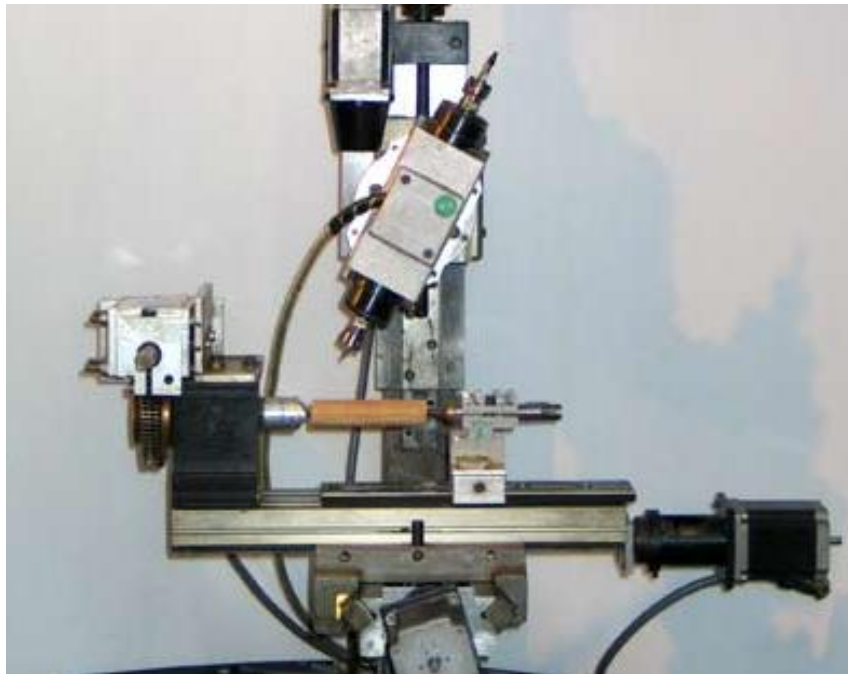
#### **1.1.5. Prototipos de fresadoras de 5 ejes CNC.**

Debido al gran avance tecnológico para la automatización de máquinas herramientas que se presenta hoy en día es común encontrar prototipos de fresadoras de 5 ejes los cuales presentan diferentes características en su configuración mecánica pero gran similitud en el sistema y software de

control. Según la configuración de los ejes rotativos tenemos los siguientes tipos de prototipos.

### **Fresadora de 5 ejes vertical con quinto eje B.**

Este prototipo fue realizado en EE.UU. partiendo de un prototipo de fresadora de 3 ejes, por lo que su recorrido está limitado a la máquina original, logrando acoplar los dos ejes rotativos, uno sobre la mesa del prototipo y otro en el cabezal, esto se puede observar en la figura 1.7.



**Figura. 1.7: Fresadora de 5 ejes vertical de eje “A”.**

FUENTE: (Gordon, 2010)

El control de movimiento se lo realiza con el software Mach3, que puede coordinar simultáneamente el movimiento de hasta 6 ejes.

### **Fresadora de 5 ejes vertical con quinto eje “A”.**

Estos prototipos se encuentran a la venta en EE.UU. y son fabricados por empresas para aplicaciones educativas. Se hace referencia a la fresadora vertical de 5 ejes modelo TN5-V8-TC8, figura 1.8.



**Figura. 1.8: Fresadora de 5 ejes TN5-V8-TC8.**

FUENTE: (Hill, 2013)

Las especificaciones de este tipo de fresadora se muestran a continuación.

Viajes, eje "X" → 500 mm

Viajes, eje "Y" → 200 mm

Viajes, eje "Z" → 280 mm

Viajes, eje "A" → 120 a -105 grados

Viajes, eje "C" → Infinito

El software de control es Mach3 permitiendo el fresado simultáneo o secuencial dependiendo de su aplicación.

**Mach 3** es un programa para máquinas CNC que permite controlar los movimientos de los ejes X, Y, Z, A, C así como la velocidad del husillo mediante códigos G. Este programa puede trabajar como fresadora, en donde se ingresan los códigos G para el maquinado de la pieza; luego se envían los datos hacia las tarjetas y posteriormente hacia los actuadores.

Los modelos existentes son: TN5-V4 cuyo sistema de movimiento de los ejes es en base a guías en cola de milano, y su costo es de USD 25.525 en su país de origen. El modelo TN5-V5 cuenta con un sistema de movimiento de los ejes basado en guías lineales, aumentando su costo a USD 30.925 en su país de origen (Artsoft, 2006).

Lo que concierne a la mecánica de estos prototipos se basa en movimientos por guías lineales, transmisión de movimiento por husillo de bolas tuerca, motores a pasos y para los ejes rotativos mesas rotativas.

Para el control de estas máquinas se aprovecha el potencial del microprocesador que tienen los ordenadores y un software de control dependiendo del sistema operativo que tenga la PC.

Para prototipos de máquinas herramientas es aconsejable utilizar motores a pasos con sus respectivos drives de control denominados engranes electrónicos ya que permiten aumentar en número de pulsos para el control de pasos y así aumentar la precisión en el posicionamiento de las mesas.

Al enunciar prototipo la investigación que se realiza esta netamente encaminada al uso didáctico para estudiantes generando inducción al mecanizado en este caso con cinco ejes de movimiento.

#### **1.1.6. Herramientas de fresado para 5 ejes.**

Las herramientas de corte más utilizadas en una fresadora de 5 ejes son similares a las utilizadas en máquinas herramientas de 3 y 4 ejes. Siendo las fresas de vástago las más usuales y las brocas para taladrar.

Una fresa está determinada por su diámetro, forma, material constituyente, número de dientes que tenga y el sistema de sujeción para con la máquina, en la figura 1.9 se aprecia distintas fresas según su terminación de su extremo.





**Figura 1.9: Herramientas para el fresado**

FUENTE: (Niebla, 2007)

### **1.1.7. Herramientas de sujeción para fresadoras de 5 ejes CNC.**

Estas herramientas de sujeción dependen de la forma del material a mecanizar, por lo que sí es de forma cilíndrica se utiliza un mandril con mordazas, o a su vez espárragos con tuerca. Si es de forma prismática se utiliza bridas de sujeción (figura 1.10).



**Figura 1.10: Herramientas de sujeción**

FUENTE: (Karlo, 2008, pág. 20)

### **1.1.8. Operaciones de fresado vertical.**

Las operaciones de fresado en una fresadora vertical de 5 ejes son similares a las operaciones realizadas por máquinas de 3 y 4 ejes, teniendo como única diferencia el mecanizado de curvas complejas. Entre estas operaciones se apuntan las más principales:

### a. **Planeado.**

Consiste en conseguir superficies planas, utilizando generalmente fresas de planear (figura 1.11), es esencial que las entradas en el corte sean uniformes para evitar vibraciones y así prolongar la vida útil de la herramienta, siempre se reduce a cero el espesor de la viruta en la salida, de esta forma se garantiza un avance y una vida útil de la herramienta más prolongada. (KRAR, 2008, pág. 145)

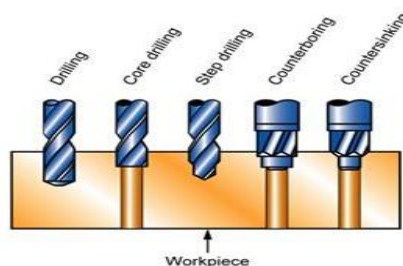


**Figura 1.11: Planeado**

FUENTE: (Hoffmann, 2013)

### b. **Ranurado recto.**

Consiste en mecanizar unas ranuras de anchura y profundidad variable, para este tipo de fresado el operario debe utilizar generalmente, fresas cilíndricas con la misma anchura que la ranura (figura 1.12).



**Figura 1.12: Ranurado recto**

FUENTE: (Karma, 2012)

**c. Fresado frontal.**

Consiste en el fresado que se realiza con fresas helicoidales que atacan frontalmente la operación de fresado (figura 1.13). En las fresadoras de control numérico se utiliza cada vez más fresas de metal duro totalmente integrales que permiten trabajar a velocidades muy altas (KRAR, 2008, pág. 146).

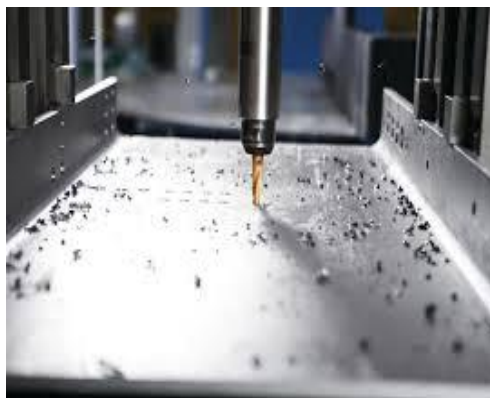


**Figura 1.13: Fresado frontal**

FUENTE: (Karma, 2012)

**d. Taladrado.**

El taladrado es un tipo de mecanizado para producir agujeros cilíndricos en una pieza con herramientas de arranque de viruta (figura 1.14).



**Figura 1.14: Taladrado.**

FUENTE: (Fagor, 2011)

### 1.1.9. Parámetros de corte en el fresado.

Los parámetros tecnológicos fundamentales que hay que considerar en el proceso de fresado son los siguientes:

- Elección de accesorios y sistema de fijación de piezas.
- Herramienta adecuada.
- Tipo De fresado: frontal, tangencial en concordancia o tangencial en oposición.
- Velocidad de corte ( $V_c$ )
- Velocidad de giro de la herramienta ( $n$ )
- Velocidad de avance ( $V_s$ )
- Profundidad de pasada ( $p$ )
- Fuerzas de corte ( $F_c$ ).
- Características del material a mecanizar.

La **velocidad de corte** se encuentra tabulada de acuerdo a las características de la fresa a utilizarse y del material a mecanizar es así como a partir de la determinación de la velocidad de corte se puede encontrar la velocidad de giro de la herramienta. (Gerling, 1996, págs. 12-22).

$$V_c \left( \frac{m}{\min} \right) = \frac{n(RPM) \times \pi \times D_c(mm)}{1000 \left( \frac{mm}{\min} \right)} \quad Ec.1.1$$

De la formula anterior podemos despejar el parámetro  $n$  para determinar la velocidad de giro de la herramienta.

La **velocidad de avance** es aquella con la que la pieza pasa debajo de la mesa, es decir es la velocidad con la que progresa el corte. También se la puede definir como el espacio que realiza la pieza en una unidad de tiempo, su cálculo se da mediante las siguientes formulas.

$$V_s = S \times n$$

$$V_s = Z \times f_z \times n$$

$$V_s = \left[ \frac{mm}{min} \right]$$

Dónde:

$V_s$  = Velocidad de avance

$S$  = Avance de la fresa ( $m$ )

$n$  = Revoluciones por minuto (RPM)

$Z$  = Avance por diente ( $m$ )

$f_z$  = Número de dientes

La **potencia de corte** está relacionada con el producto de la fuerza de corte y su velocidad de corte, y se obtiene utilizando la siguiente formula.

$$P_c = F_c \times V_c \quad \text{Ec.1.2}$$

De la formula anterior podemos despejar la **fuerza de corte**, parámetro esencial para realizar cualquier tipo de mecanizado.

Otra fórmula para encontrar la **potencia de corte** es la siguiente:

$$K_s = \frac{F_c}{A_c} \quad \Rightarrow \quad A_c = a \times V_s$$

$$F_c = K_s \times A_c \quad \text{Ec.1.3}$$

$$P_c = K_s \times A_c \times V_c \quad [W]$$

$$P_c = \frac{K_s \times A_c \times V_c}{1000} \quad [KW]$$

Dónde:

$P_c$  = Potencia de corte

$V_c$  = Velocidad de corte

$K_s$  = Presión de corte ( $N/mm^2$ )

$A_c$  = Área de corte (mm<sup>2</sup>)

$a$  = Profundidad de fresado

**Tabla 1.1. Valores de presión específica de corte para materiales blandos.**

FUENTE: (Kalpakjian, 2000, pág. 532)

Material	$K_s$ N/mm <sup>2</sup>
Aluminio	100
Cobre	78
Latón	54
Plásticos	19

## 1.2 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.

### 1.2.1. Propiedades mecánicas del aluminio.

El aluminio es un material blando y maleable. En estado puro tiene un límite de resistencia en tracción de 160-200 N/mm<sup>2</sup> (160-200 MPa).

Para mejorar estas propiedades se alea con otros metales, lo que permite realizar sobre él operaciones de fundición y forja, así como la extrusión del material. Para máquinas herramientas los parámetros generales del aluminio son (Larburu, 1990, pág. 489):

Velocidad de corte:

$$V_c \quad \max = 160 \left( \frac{m}{\min} \right) \rightarrow \text{Desbaste}$$

$$V_c \quad \min = 180 \left( \frac{m}{\min} \right) \rightarrow \text{Acabado}$$

Avances:

$$S \quad \max = 0.75 \left( \frac{mm}{\min} \right) \rightarrow \text{Desbaste}$$

$$S \quad \min = 0.6 \left( \frac{mm}{\min} \right) \rightarrow \text{Acabado}$$

Esfuerzo del material:

$$\sigma = 1000 \text{ psi} \rightarrow \left(6.89 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right)$$

Profundidad de corte axial ( $a$ ):

$$a = 3 \text{ mm} \text{ Recomendado (Sandvik, 1985, pág. 91)}$$

Profundidad de corte radial ( $s$ ):

$$s = 0.8 \text{ mm} \text{ (Sandvik, 1985, pág. 8)}$$

### **1.2.2. Propiedades mecánicas de los aceros.**

El acero es una aleación de hierro y carbono, donde el hierro es el elemento predominante mientras que el carbono no supera el 3.5% que le otorga mayor resistencia y pureza. Se usan para fabricar material en láminas destinadas a aplicaciones en diferentes industrias, sus distintas clases están presentes de forma abrumadora en nuestra vida cotidiana en forma de herramientas, utensilios, equipos mecánicos y formando parte de electrodomésticos y maquinaria en general.

Para aceros de bajo carbono el porcentaje de carbono es de 0.2% y 0.3%, este es utilizado para construcciones, a medida que el contenido de carbono aumenta en los aceros al carbono simples, estos se vuelven más resistentes pero menos dúctiles. Los aceros con contenido mediano de carbono (1020-1040) tienen aplicación en ejes y engranajes (Flores, 2011).

Los aceros inoxidable se utilizan principalmente por su excelente resistencia a la corrosión en muchos medios como en la industria, automoción, construcción y generalmente en la elaboración de electrodomésticos. Gracias su estética e higiene el acero inoxidable es un

material muy atractivo para satisfacer diversos tipos de demandas como por ejemplo la industria médica.

**Tabla 1.2. Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas del acero.**

FUENTE: (Smith, 2001, pág. 439)

<b>PROPIEDADES MECÁNICAS DE ACEROS AL CARBONO SIMPLES</b>					
Aleación Número AISI- SAE	Composición Química (% en peso)	Estado	Límite Elástico o $S_y$ (MPa)	Alarga miento	Aplicaciones Típicas
1020	0.20 C, 0.45 Mn	Lam. Tosco Recocid o	331 297	36 36	Planchas y secciones estructurales de acero; ejes, engranajes.
1040	0.40 C, 0.45 Mn	Lam. Tosco Recocid o Revenid o	414 352 593	25 30 20	Ejes, pernos, tubos, con alta resistencia a la tensión, engranajes.
<b>PROPIEDADES MECÁNICAS DE ACEROS INOXIDABLES</b>					
Aleación Número AISI- SAE	Composición Química (% en peso)	Estado	Límite Elástico o $S_y$ (MPa)	Alarga miento %	Aplicaciones Típicas
410	12,5 Cr., 0,15 C	Recocid o	276	30	Termo tratables de uso general; piezas de máquinas, ejes, válvulas.

### 1.3 SISTEMAS DE CONTROL.

Los sistemas de control, se aplican en esencia para las máquinas y las organizaciones.



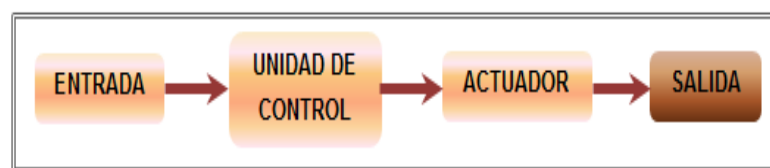
Un sistema de control está definido como un conjunto de componentes que pueden regular su propia conducta o la de otro sistema con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado, de modo que se reduzca las probabilidades de fallos y se obtenga los resultados buscados.

Estos sistemas se usan típicamente en sustituir un trabajo pasivo que controla un determinado sistema (ya sea eléctrico, mecánico, etc.) con una posibilidad nula o casi nula de error.

Los sistemas de control deben conseguir los siguientes objetivos. Ser estables y robustos frente a perturbaciones y errores en los modelos, ser eficiente según un criterio preestablecido evitando comportamientos bruscos e irreales (Rocha, 2011).

### 1.3.1. Sistemas de control de lazo abierto.

Son sistemas en los cuales la salida no se compara con la entrada de referencia, esto significa que no hay retroalimentación hacia el controlador para que este pueda ajustar la acción de control. Es decir, la señal de salida no se convierte en señal de entrada para el controlador, como se observa en la figura 1.15.



**Figura 1.15: Sistema de control de lazo abierto.**

Estos sistemas se caracterizan por:

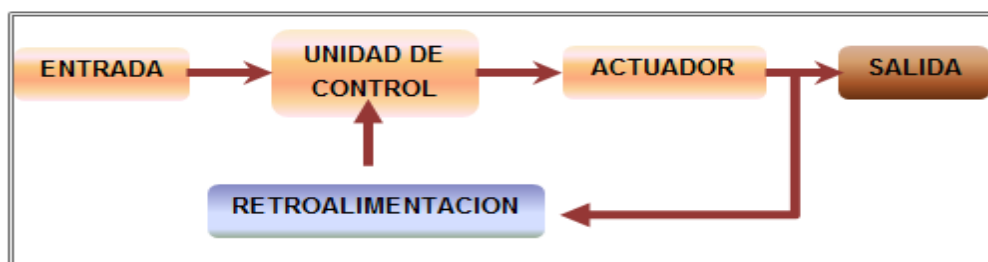
- Ser sencillos y de fácil concepto.
- Nada asegura su estabilidad ante una perturbación.
- Ser afectado por perturbaciones. Estas pueden ser tangibles o intangibles.

- La salida no se compara con la entrada.
- La precisión depende de la previa calibración del sistema.

### 1.3.2. Sistema de control de lazo cerrado.

Son los sistemas en los que la acción de control está en función de la señal de salida. Los sistemas de circuito cerrado usan la retroalimentación desde un resultado final para ajustar la acción de control en consecuencia, el control en lazo cerrado es imprescindible cuando se da alguna de las siguientes circunstancias.

- Cuando un proceso no es posible de regular por el hombre.
- Una producción en gran escala que exige grandes instalaciones y el hombre no es capaz de manejar.
- Vigilar un proceso es especialmente difícil en algunos casos y requiere una atención que el hombre puede perder fácilmente por cansancio o despiste, con los siguientes riesgos que ello pueda ocasionar al trabajador y al proceso (figura 1.16).



**Figura 1.16: Sistemas de control de lazo cerrado**

Sus características son:

- Ser complejos, pero amplios en cantidad de parámetros.
- La salida se compara con la entrada y afecta para el control del sistema.
- Su propiedad de retroalimentación.
- Ser más estable a perturbaciones y variaciones internas.

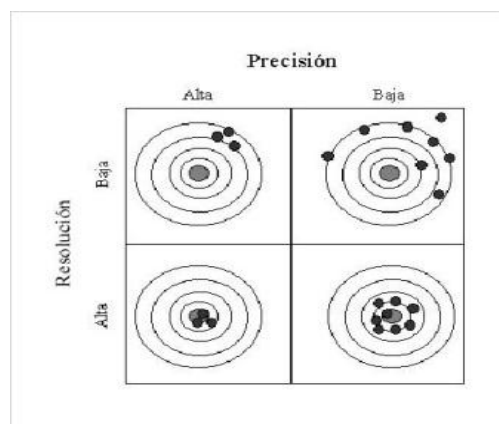
### 1.3.3. Precisión, repetibilidad y resolución.

La **precisión** es la capacidad de una máquina o instrumento de medida de dar el mismo resultado en mediciones diferentes realizadas en las mismas condiciones. Esta cualidad debe evaluarse a corto plazo, la precisión refleja la proximidad de distintas medidas entre sí, y es función exclusiva de los errores accidentales.

**Repetibilidad** es la proximidad entre los resultados de mediciones sucesivas de una misma magnitud, efectuado con el mismo método, por el mismo observador, con los mismos instrumentos en el mismo lugar y a intervalos cortos de tiempo.

Se denomina **resolución** al menor cambio en la magnitud de entrada que se aprecia en la magnitud de salida. Sin embargo, la precisión es el máximo error esperado en la medida.

La resolución puede ser de menor valor que la precisión. Por ejemplo, si al medir una distancia la resolución es de 0.01mm, pero la precisión es de 1mm, entonces puede apreciarse variaciones en distancia medida de 0.01mm, pero no puede asegurarse que haya un error de medición menor de 1mm (Mandado, 1995, pág. 20), figura 1.17.



**Figura 1.17: Precisión y resolución**

FUENTE: (Gordón, 2013, pág. 18)

## **1.4 ACTUADORES ELÉCTRICOS, ELEMENTOS DE CONTROL.**

Los actuadores son dispositivos encargados de efectuar acciones físicas ordenadas por algún sistema de control. Los elementos de control son aquellos que permiten realizar la conexión y desconexión de los circuitos eléctricos. Los elementos de protección son dispositivos que evitan daños a una máquina herramienta. (Aguirre, 2008)

### **1.4.1. Actuadores eléctricos.**

#### **a. Motores eléctricos.**

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas que transforman energía eléctrica en energía mecánica por medio de campos electromagnéticos variables. Algunos de los motores eléctricos son reversibles, pueden transformar energía mecánica en energía eléctrica funcionando como generadores (Bolaños, 2013). Su utilidad es amplia en la industria como por ejemplo en la elaboración de máquinas herramientas, la figura 1.18 muestra los diferentes tipos de motores.



**Figura 1.18: Tipos de motores eléctricos**

FUENTE: (Dani, 2008)

Para la elaboración de máquinas herramientas y prototipos de máquinas herramientas los motores generalmente empleados son:

- Servomotor
- Motor paso a paso

**b. Servomotor.**

El servomotor " también llamado servo ", es un dispositivo similar a un motor de corriente continua que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de un rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición (figura 1.19).



**Figura 1.19: Servomotor.**

FUENTE: (Hannifin, 2007)

Un servomotor es un motor eléctrico que consta con la capacidad de ser controlado, tanto en velocidad como en posición.

Existen tres tipos de servomotores que son: servomotores de corriente continua, servomotores de corriente alterna, y servomotores de imanes permanente o brushless (TodoRobot, 2013).

### **c. Motores a pasos.**

Los motores a paso son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos, por lo que se pueden mover un paso a la vez por cada pulso que se aplique.

Este paso puede variar desde  $90^\circ$  hasta pequeños movimientos de tan solo  $1.8^\circ$ , es decir, que se necesitan 4 pasos en el primer caso ( $90^\circ$ ) y 200 para el caso de ( $1.8^\circ$ ), para completar un giro completo de  $360^\circ$ .

Estos motores poseen la habilidad de quedar enclavados en una posición o bien totalmente libres (TodoRobot, 2013), la figura 1.20 muestra algunos motores a paso.



**Figura 1.20: Motores a paso.**

FUENTE: (TodoRobot, 2013)

### **1.4.2. Elementos de control.**

Existen una gran cantidad de tipos de elementos de control como los que se presenta a continuación.

#### **a. Interruptores.**

Son componentes que permiten o impiden el paso de la corriente eléctrica, según el estado en que se encuentren. En la figura 1.21 se observa dos tipos de interruptores.



**Figura 1.21: Interruptores.**

**b. Relé**

Cumplen la misma función que los interruptores, pero en lugar de activarse manualmente, su conexión/desconexión se realiza por medio de un circuito eléctrico por el cual circula una corriente de valor reducido que activa la bobina de un electroimán abriendo o cerrando contactos. En figura 1.22 se observa un relé para pequeñas potencias.



**Figura 1.22: Relé para pequeñas potencias**

**c. Sensores.**

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas.

Los sensores más utilizados dentro de automatización y control CNC son los siguientes: Sensores de contacto, sensores infrarrojos, y sensores de posición angular

**Sensor de contacto:** El sensor de contacto (también llamado interruptor de límite), son dispositivos eléctricos, neumáticos o mecánicos situados al final del recorrido de un elemento móvil, como por ejemplo una cinta transportadora, con el objetivo de enviar señales que puedan modificar el estado de un circuito eléctrico. Internamente puede contener interruptores normalmente abiertos (NA), normalmente cerrados (NC) o conmutadores dependiendo de la operación que cumplan al ser accionados (Sensores, 2011), ver figura 1.23.



**Figura 1.23: Sensores de contacto.**

FUENTE: (Alicante, 2009)

**Sensor infrarrojo:** El receptor de rayos infrarrojos suele ser un fototransistor o un fotodiodo. El circuito de salida utiliza la señal del receptor para amplificarla y adaptarla a una salida que el sistema pueda entender. La señal enviada por el emisor puede ser codificada para distinguirla de otra y así identificar varios sensores a la vez esto es muy utilizado en la robótica en caso en que se necesita tener más de un emisor infrarrojo y solo se quiera tener receptor (Sensores, 2011), (figura 1.24).



**Figura 1.24: Sensor infrarrojo.**

FUENTE: (Barragán, 2011)

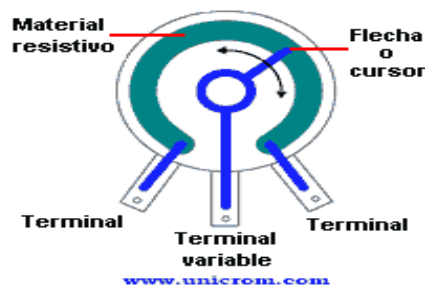


#### d. Sensores de posicionamiento angular.

Dentro de estos sensores encontramos a los potenciómetros y encoders.

El **potenciómetro** es un transductor de posición angular, de tipo absoluto y con salida de tipo analógico. Consiste en una resistencia de hilo bobinado o en una pista de material conductor, distribuida a lo largo de un soporte en forma de arco y un cursor solidario a un eje de salida, que puede deslizarse sobre dicho conductor.

El movimiento del eje arrastra el cursor provocando cambios de resistencia entre éste y cualquiera de los extremos (Ming, 2003, pág. 52). Ver figura 1.25.



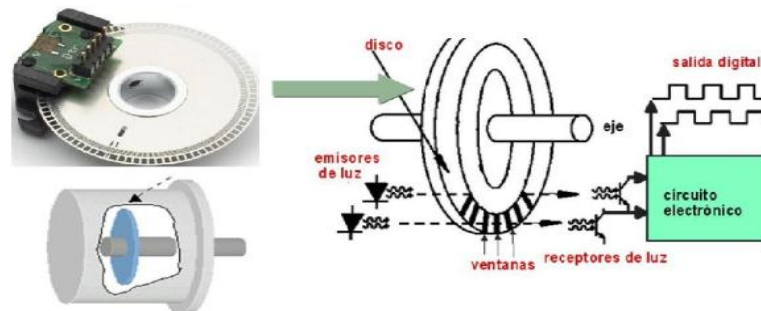
**Figura 1.25: Potenciómetro.**

FUENTE: (Alicante, 2009)

El **encoder** es un sensor que genera señales digitales en respuesta al movimiento, es un dispositivo formado por un rotor con uno o varios grupos de bandas opacas y translúcidas alternadas, y por una serie de captadores ópticos alojados en el estator, que detectan la presencia o no de banda opaca frente a ellos. Existen 2 tipos de encoders que son:

**Encoders incrementales:** generan pulsos mientras se mueven, se utilizan para medir la velocidad o la trayectoria de posición. Este tipo de encoders se caracteriza porque determinan su posición, contando el número de impulsos que se generan cuando el rayo de luz, es atravesado por marcas opacas en la superficie de un disco unido al eje. En el estator hay como

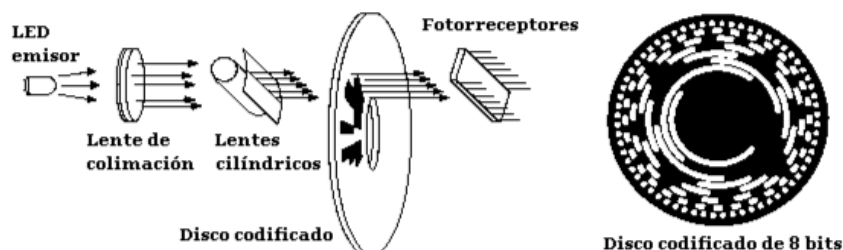
mínimo dos pares de foto - receptores ópticos, escalados un número entero de pasos más  $\frac{1}{4}$  de paso. Al girar el rotor genera una señal cuadrada, el escalado hace que la señal tenga un desfase de  $\frac{1}{4}$  de periodo si el rotor gira en un sentido y de  $\frac{3}{4}$  si gira en el sentido contrario, lo que se utiliza para discriminar el sentido de giro (Ming, 2003, pág. 54), ver figura 1.26.



**Figura 1.26: Encoder incremental.**

FUENTE: (Mining, 2012)

**Encoders Absolutos:** son aquellos que generan multi-bits digitales, que indican directamente su posición actual. Contiene un disco con varias bandas dispuestas en forma de coronas circulares concéntricas, dispuestas de tal forma que en sentido radial el rotor queda dividido en sectores, con marcas opacas y transparentes codificadas en código Gray, según la posición del disco, la luz emitida por cada emisor se enfrentara a un sector opaco o transparente (Ming, 2003, pág. 63). Ver figura 1.27.



**Figura 1.27: Encoder absoluto**

FUENTE: (Mining, 2012)

## 1.5 NORMAS DE SEGURIDAD PARA EL TRABAJO CON MÁQUINAS HERRAMIENTAS.

### 1.5.1. Recomendaciones generales.

Se debe asegurar que los interruptores que encienden las máquinas, no sean accionados involuntariamente, ya que ocasionan accidentes e incluso la muerte del operario. Los sistemas mecánicos tales como los engranajes, correas de transmisión, poleas, husillos, cadenas, etc. Deben ser cubiertas para su protección. Las operaciones de comprobación se deben realizar con la máquina parada. Peligros comunes: puntos de rozamiento, puntos calientes, superficies rotativas de máquinas, maquinaria automática, uso de joyas y ropa inadecuada.

Protección personal: Los operarios deben usar gafas de seguridad. La viruta producida durante el mecanizado nunca debe retirarse con la mano, ya que ocasionaría cortes, por lo cual se debe utilizar un cepillo o brocha y con la máquina apagada. La ropa de trabajo debe ser ajustada, en especial las mangas que deben estar ceñidas a la muñeca. El calzado debe proteger contra cortes y pinchazones, así como también contra caídas de piezas pesadas. No se deben utilizar anillos, relojes, pulseras, cadenas en el cuello, o bufandas ya que conllevan un gran peligro (Gordón, 2013, págs. 26-28). En la figura 1.28 se muestran los diferentes equipos de protección personal.



Figura 1.28: Protección personal

FUENTE: (Tecnología, 2012)

### **1.5.2. Seguridad antes del mecanizado.**

Antes de poner en marcha la máquina para realizar el trabajo de mecanizado se debe tomar en cuenta las siguientes acciones.

- Que el dispositivo de sujeción de piezas, este fuertemente anclado a la mesa de la máquina.
- Que la pieza a trabajar este correcta y firmemente sujeta al dispositivo de sujeción
- Que las carcasas de protección de los elementos mecánicos como poleas, husillos y cadenas estén en su sitio y bien fijadas.
- No remover barreras protectores de la máquina
- Que los dispositivos de protección se encuentren en su sitio y correctamente instalados

### **1.5.3. Seguridad durante el mecanizado.**

Durante el mecanizado se deben tener las manos alejadas de la herramienta de corte.

Todas las operaciones de comprobación, ajuste, etc., deben realizarse con la máquina parada, especialmente las siguientes.

- Alejarse o abandonar el puesto de trabajo
- Sujetar la pieza a mecanizar
- Medir y calibrar
- Comprobar el acabado
- Limpiar y engrasar
- Ajustar protecciones
- Dirigir el chorro del líquido refrigerante, etc.

## **CAPÍTULO II**

### **DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO DEL PROTOTIPO DE CENTRO DE MECANIZADO VERTICAL DE 5 EJES CNC**

#### **2.1 PARÁMETROS GENERALES DE DISEÑO.**

Debido a que la geometría de la máquina descrita en la sección 1.1.4 muestra un cabezal robusto. Para el presente prototipo se optó por una fresadora vertical con quinto eje “A”, así también se rediseñara la transmisión de movimiento para el eje “Z”.

El prototipo de fresadora vertical de 5 ejes tendrá como aplicación las diferentes operaciones de fresado descritas en la sección 1.1.8, en materiales de baja dureza como acrílico, madera y aluminio. Las herramientas a usarse serán fresas de vástago, sección 1.1.6, el diámetro máximo de la fresa será de 6mm.

#### **a. Recorrido de los ejes.**

Debido a que el recorrido de los ejes principales del prototipo están limitados por su geometría original, se mantendrán los recorridos de los ejes X,Y,Z, mientras que el recorrido de los ejes A y C se basaran en prototipos existentes, sección 1.1.4.

Recorrido en el eje “X”:	140 mm.
Recorrido en el eje “Y”:	86 mm.
Recorrido en el eje “Z”:	215 mm.
Recorrido en el eje “A”:	$\pm 90^\circ$ .
Recorrido en el eje “C”:	$\pm 360^\circ$ . (Infinito)

### **b. Dimensiones del material a mecanizar.**

El radio de la mesa rotativa del eje "C" será de 76.2mm (3"), este valor es asociado a que en una máquina herramienta al aumentar su número de ejes provoca que disminuya su área de trabajo, por tal motivo la forma del material será de preferencia cilíndrica y sus dimensiones son de diámetro 70mm, una altura de 35mm por lo que la masa externa para mecanizar es de 0.36 Kg.

### **c. Fuerza de corte.**

El material como máximo a mecanizar es el aluminio los valores de, avance (S), profundidad de corte (a), y presión específica ( $K_s$ ) se muestran en la sección 1.2.1. Entonces se utiliza la expresión siguiente para cálculo de la fuerza de corte, sección 1.1.9 ecuación 1.3.

$$F_C = K_s \times A_C \quad [N]$$

Dónde:

$$A_C = s \times a$$

$$A_C = 0.8mm \times 5mm$$

$$A_C = mm^2$$

$$F_C = K_s \times A_C$$

$$F_C = 100 \frac{N}{mm^2} \times 3.75mm^2$$

$$F_C = 375[N]$$

### **d. Cargas estáticas sobre los ejes.**

Para determinar las cargas estáticas a las cuales están sometidos los ejes consideramos las propiedades físicas de los materiales que componen la estructura de movimiento mecánico de cada eje para ello se utilizó el software SolidWorks los detalles de masa se describen en la tabla 2.1, además intervine una carga externa que es el peso del material más la fuerza de corte.

**Tabla 2.1. Valores de masa de las estructuras de los ejes.**

<b>Estructura ejes</b>	<b>Masa (Kg)</b>
C	4.21
A	5.52
X	5
Y	2
Z	12

• **Cargas en el eje rotativo C.**

$$L_C = W_m + F_C \quad Ec \quad 2.1$$

Dónde:  $L_C$  Fuerza resultante en el eje "C" [N]

$W_m$  Peso del material a mecanizar [N]

$F_C$  Fuerza de corte [N]

$$L_C = (m_{externa} \times g) + F_C$$

$$L_C = \left( 0.36Kg \times 9.8 \frac{m}{s^2} \right) + 375N$$

$$L_C = 378.53N$$

• **Cargas en el eje rotativo A.**

$$L_A = W_{TC} + W_{TA} + F_c \quad Ec \quad 2.2$$

Dónde:  $L_A$  Fuerza resultante en el eje "A" [N]

$W_{TC}$  Peso total del eje "C" [N]

$W_{TA}$  Peso del eje "A"

$F_C$  Fuerza de corte [N]

$$L_A = \left[ (m_{C \text{ estructura}} \times g) + (m_{A \text{ estructura}} \times g) + (m_{\text{externa}} \times g) \right] + F_C$$

$$L_A = \left[ \left( 4.21Kg \times 9.8 \frac{m}{s^2} \right) + \left( 5.52Kg \times 9.8 \frac{m}{s^2} \right) + \left( 0.36Kg \times 9.8 \frac{m}{s^2} \right) \right] + 375N$$

$$L_A = 462.07N$$

- **Cargas en el eje principal “X”.**

$$L_X = W_{TC} + W_{TA} + W_{TX} + W_m + F_c \quad Ec \ 2.3$$

Dónde:	$L_X$	Fuerza resultante en el eje “X”	[N]
	$W_{TC}$	Peso total del eje “C”	[N]
	$W_{TA}$	Peso total del eje “A”	[N]
	$W_{TX}$	Peso total del eje “X”	[N]
	$W_m$	Peso del material a mecanizar	[N]
	$F_C$	Fuerza de corte	[N]

$$L_X = \left[ \begin{array}{l} (m_{C \text{ estructura}} \times g) + (m_{A \text{ estructura}} \times g) + (m_{X \text{ estructura}} \times g) + \\ (m_{\text{externa}} \times g) \end{array} \right] + F_C$$

$$L_X = \left[ \begin{array}{l} \left( 4.21Kg \times 9.8 \frac{m}{s^2} \right) + \left( 5.52Kg \times 9.8 \frac{m}{s^2} \right) + \\ \left( 5Kg \times 9.8 \frac{m}{s^2} \right) + \left( 0.36Kg \times 9.8 \frac{m}{s^2} \right) \end{array} \right] + 375N$$

$$L_X = 522.49N$$

- **Cargas en el Eje Principal “Y”.**

$$L_Y = W_{TC} + W_{TA} + W_{TX} + W_{TY} + W_m + F_c \quad Ec \ 2.4$$

Dónde:	$L_Y$	= Fuerza resultante en el eje “Y”	[N].
	$W_{TC}$	= Peso total del eje “C”	[N].
	$W_{TA}$	= Peso total del eje “A”	[N].
	$W_{TX}$	= Peso total del eje “X”	[N].
	$W_{TY}$	= Peso total del eje “Y”	[N].



$$W_m = \text{Peso del material a mecanizar} \quad [N].$$

$$F_C = \text{Fuerza de corte} \quad [N].$$

$$L_Y = (m_C \text{ estructura}) * g + (m_A \text{ estructura}) * g + (m_X \text{ estructura}) * g \\ + (m_Y \text{ estructura}) * g + (m_{\text{externa}}) * g + F_C$$

$$L_Y = (4.21kg) * \left(\frac{9.8m}{s^2}\right) + (5.52kg) * \left(\frac{9.8m}{s^2}\right) + (5kg) * \left(\frac{9.8m}{s^2}\right)$$

$$+ (2 kg) * \left(\frac{9.8m}{s^2}\right) + (0.36kg) * \left(\frac{9.8m}{s^2}\right) + 375 N$$

$$L_Y = 542.48 N$$

- **Cargas principales en el eje "Z".**

$$L_Z = W_Z + F_c \quad Ec \quad 2.5$$

Dónde:  $L_Z$  Fuerza resultante en el eje "Z" [N]

$W_Z$  Peso total del eje "Z" [N]

$F_C$  Fuerza de corte [N]

$$L_Z = (m_{\text{externa}} \times g) + F_C$$

$$L_Z = \left(12Kg \times 9.8 \frac{m}{s^2}\right) + 375N$$

$$L_Z = 595.6N$$

**e. Velocidad de giro de la herramienta.**

Con la ecuación de velocidad de corte sección 1.1.9 ecuación 1.1, se despeja el número de revoluciones a la que gira la herramienta, donde velocidad de corte es de 180 m/min, y el diámetro máximo de la fresa es de 6mm.

$$n = \frac{v_{\text{corte}} \times 1000}{\pi \times D} [rpm]$$

Y se tiene:

$$n = 9549.3 [RPM]$$

**f. Potencia de corte.**

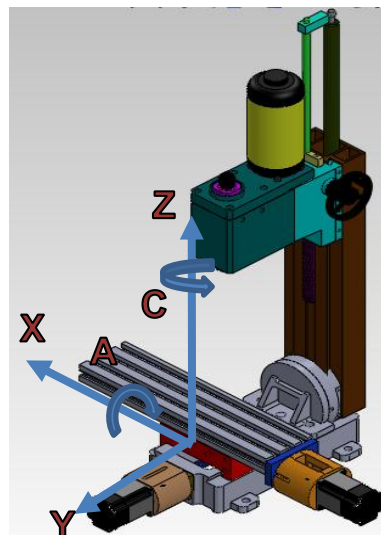
La potencia de corte se calcula con la expresión dada a continuación sección 1.1.9 ecuación 1.2, y con los valores de fuerza de corte 375 N, y velocidad de corte 180 m/min obtenidos.

$$P_c = F_c \times V_c$$

$$P_c = 1000[W] \approx 1.33[HP]$$

**2.2 SISTEMA MECÁNICO DEL PROTOTIPO DE FRESADORA VERTICAL DE 5 EJES CNC**

Luego de establecer todos los parámetros de diseño para el prototipo, se inicia con el diseño de los elementos para el sistema mecánico de movimiento. Con ayuda del software SolidWorks se realiza el diseño óptimo para el movimiento completo del prototipo, como se aprecia en la figura 2.1. Innovando características mecánicas que permitan cumplir a cabalidad los requerimientos de la máquina con los parámetros establecidos.



**Figura 2.1: Prototipo fresadora vertical de 3 ejes CNC.**

### 2.2.1. Descripción del sistema mecánico para el movimiento del eje principal “Y”.

En la figura 2.2 se aprecia el sistema mecánico que se aplica en el movimiento lineal del eje “Y”, en el que se utiliza el mismo principio aplicado a la estructura original del prototipo de fresadora vertical de 3 ejes, que consta de: sistema de guías lineales (cola de milano), transmisión de movimiento por husillo con rodamiento de bolas - tuerca.

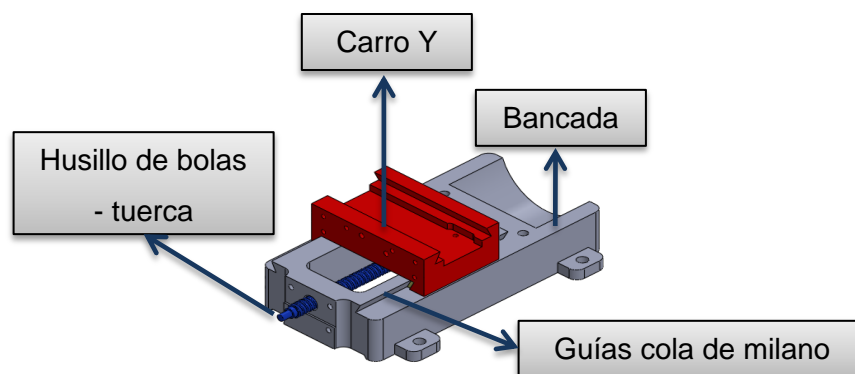


Figura 2.2: Mecanismo de movimiento del eje “Y”.

### 2.2.2. Descripción del sistema mecánico para el movimiento del eje principal “X”

En la figura 2.3 se muestra el sistema mecánico para el movimiento del eje “X”, en el que se utiliza el mismo mecanismo aplicado a la estructura original del prototipo de fresadora vertical de 3 ejes, que consta de un sistema de: guías lineales (cola de milano), y transmisión de movimiento por husillo con rodamiento de bolas - tuerca.

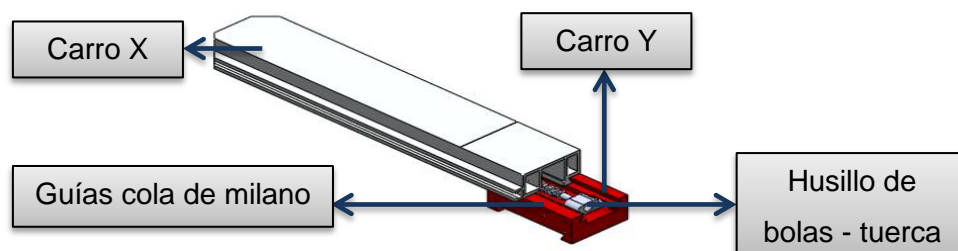


Figura 2.3: Mecanismo de movimiento del eje “X”

### 2.2.3. Diseño del sistema mecánico para el movimiento del eje principal “Z”.

En la figura 2.4 se aprecia el sistema mecánico para el movimiento del eje “Z”, el cual mantendrá las guías lineales cola de milano original del prototipo de fresadora vertical de 3 ejes, pero tendrá su variante en la transmisión del movimiento, se implementará un husillo de bolas –tuerca.

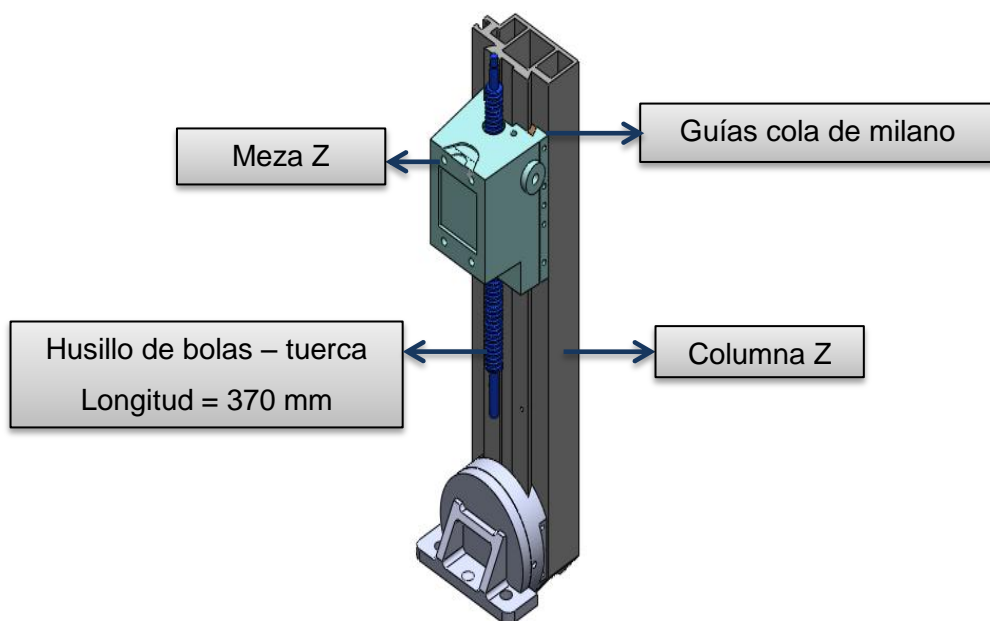


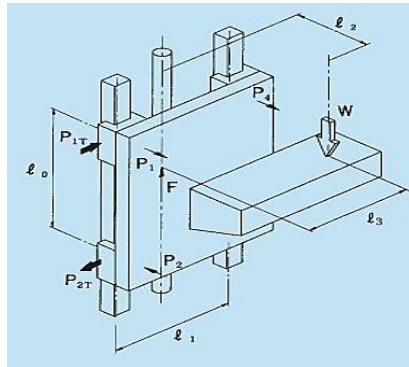
Figura 2.4: Mecanismo de movimiento del eje “Z”

#### a. Cálculo del Sistema de Guías.

En el sistema de guías para un sistema de movimiento se encuentra en cada apoyo diferentes fuerzas, que se las determina usando las siguientes ecuaciones y haciendo referencia a la figura 2.5. Tomando en consideración que es un análisis estático (THK, 2010, pág. 102).

$$P_1 \approx P_4 = \frac{W}{2} \times \frac{l_2}{l_0} \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$P_{1T} \approx P_{4T} = \frac{W}{2} \times \frac{l_3}{l_0}$$



**Figura 2.5: Esquema de fuerzas para el sistema de guías**

FUENTE: (THK, 2010, pág. 105)

Las condiciones de trabajo de este sistema de guías lineales es la siguiente:

Tipo de instalación: Vertical

Tipo de movimiento: Ascenso y descenso.

Condiciones de Operación:

W: Carga del cabezal fresador: 595,6 N

L2: Longitud entre transmisión y W: 159 mm.

L3: Distancia entre guía y W: 41,25 mm.

L0: Distancia entre bloques (sentido axial): 115 mm.

Por lo que:

$$P_1 \approx P_4 = \frac{595,6}{2} \times \frac{159}{115}$$

$$P_1 \approx P_4 = 411,74 \text{ N} \quad y$$

$$P_{1T} \approx P_{4T} = \frac{595,6}{2} \times \frac{41,25}{115}$$

$$P_{1T} \approx P_{4T} = 106,82 \text{ N}$$

Para el análisis de esfuerzos en las guías tomamos el valor obtenido en las fuerzas de P1 similar a P4. Este es un análisis estático en el que interviene el momento flector máximo en la estructura.

Si consideramos un factor de seguridad  $N= 3$  (Mott, 2006, pág. 185); el material es aleación de aluminio ( $S_y = 110$  MPa). Se tiene con la ecuación 2.7:

$$\sigma' < \sigma_d = \frac{S_y}{N} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Dónde:

$\sigma'$ : Esfuerzo Máximo. [MPa]

$\sigma_d$  : Esfuerzo de diseño. [MPa]

$S_y$ : Limite elástico del material. [MPa]

$N$ : Factor de Seguridad.

El esfuerzo máximo de diseño es:

$$\sigma' < \sigma_d = \frac{110 \text{ MPa}}{3} = 37 \text{ MPa}$$

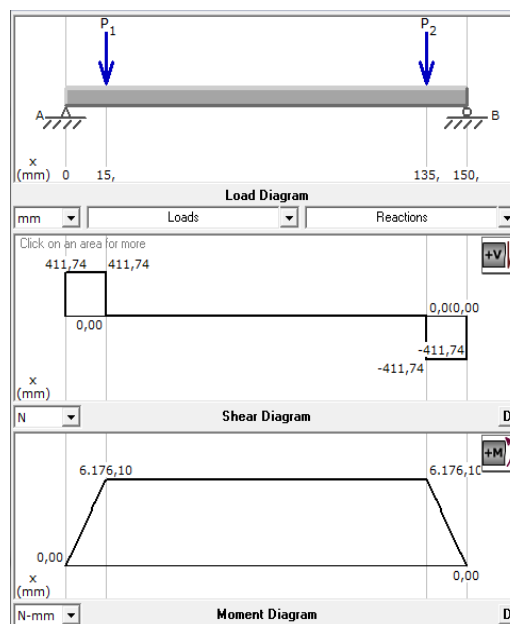


Figura 2.6: Esquema de fuerzas y momentos para los ejes guías.

En la figura 2.6 se observa el diagrama de fuerzas y momentos que se genera en las guías, realizado con ayuda del software MDSolids, y que aborta como resultado un momento flector máximo de 6176,10 N-mm.

El valor del módulo de la sección transversal viene dado por la ecuación de diseño (Mott, 2006, pág. 289)

$$S = M/\sigma_A \quad \text{Ec. 2.8}$$

$$S = 6176,10 \text{ Nmm}/37 \text{ MPa}$$

$$S = 166,92 \text{ mm}^3$$

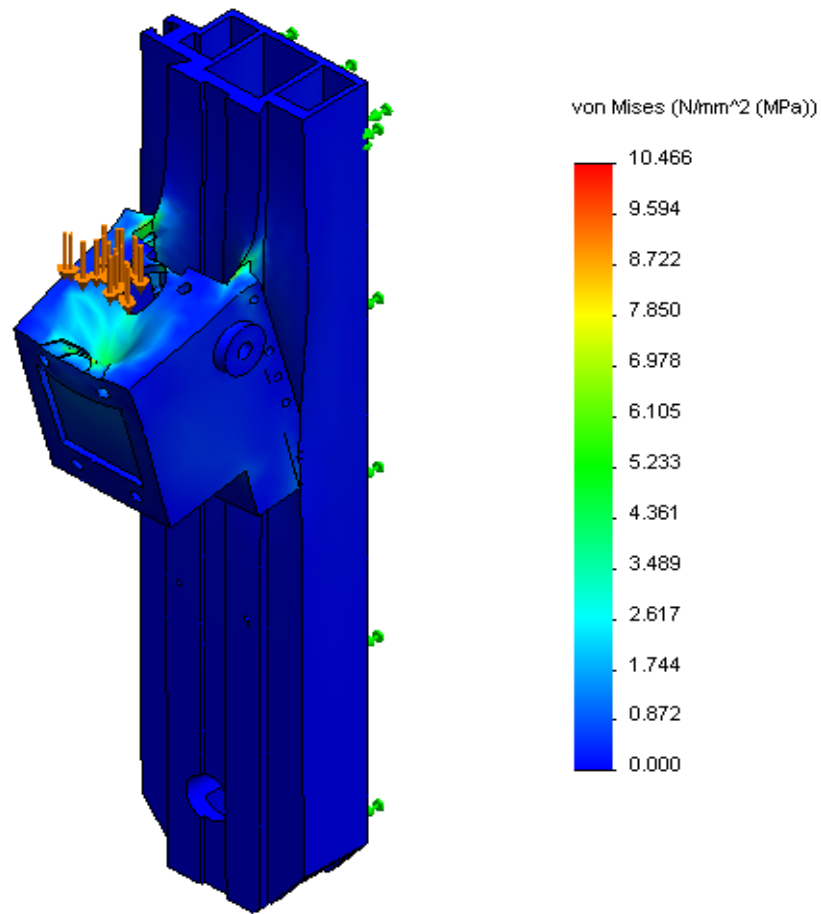
El espesor de la placa soporte es de (Mott, 2006, pág. A1):

$$H = \sqrt[3]{\frac{6S}{B}} \quad \text{Ec. 2.9}$$

$$H = \sqrt[3]{\frac{6(166,92\text{mm}^3)}{64}}$$

$$H = 2,50 \text{ mm}$$

Por lo que mantenemos el espesor de 4mm en la placa soporte de la guía. Mediante el software SolidWorks Simulation se obtuvo el análisis de esfuerzos estáticos que soportaran las guías, los siguientes resultados que se muestran en la figura 2.7, indica de manera gráfica la deformación que se genera a causa de la carga estática en la estructura y una escala cuantitativa en MPa haciendo referencia a la teoría de tensiones de Von Mises donde se encuentran los máximos y mínimos valores de tensión generados.



**Figura 2.7: Escala de tensiones según el criterio de Von Mises.**

Por lo que tenemos que la tensión de esfuerzo máximo es de 10,47 MPa, y el esfuerzo de diseño es de 37 MPa cumpliendo la ecuación 2.7.

$$\sigma' < \sigma_d$$

$$10,47MPa < 37 MPa$$

De la ecuación anterior podemos observar que existe un sobredimensionamiento de la estructura, debido a que se mantuvo la estructura original.



## **b. Cálculo del husillo roscado de bolas eje “Z”.**

Los husillos de bolas deberían seleccionarse en base al coeficiente de carga estática básica, en lugar de basarse en la vida del rodamiento cuando están sujetos a cargas de choque continuas o intermitentes, mientras están parados o a velocidades muy bajas durante cortos periodos.

La carga permisible se determina por la deformación permanente causada por la carga que actúa sobre los puntos de contacto.

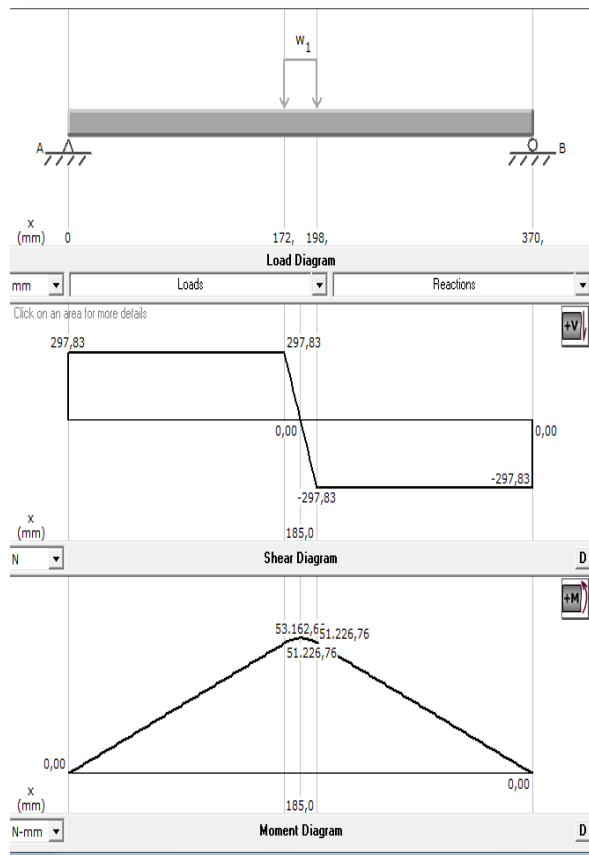
ISO lo define como la carga estática puramente axial y teóricamente central que creará una deformación permanente total (elemento rodante + superficie roscada) igual a 0.0001 del diámetro del elemento rodante.

Un husillo de bolas debe seleccionarse por su coeficiente de carga estática básica que debe ser, por lo menos, igual al producto de la carga estática axial máxima aplicada y el factor de seguridad “N”. Se deja claro que una vez calculado y seleccionado el husillo roscado, su tuerca debe satisfacer las necesidades geométricas del husillo, es decir que el acople entre estos dos elementos para formar el sistema de transmisión debe ser de alta calidad. Esto dependerá claro de la manufactura o adquisición de los mismos (SKF, 2010, pág. 10).

Para la selección del husillo del eje “Z” se utiliza la longitud del husillo sección 2.1 y la fuerza de la carga  $L_Z$  sección 2.1 literal d.

Si se considera un factor de seguridad  $N = 3$  y una resistencia a la fluencia en el acero plata (AISI-410)  $S_y = 276 \text{ MPa}$ , de acuerdo a la ecuación 2.7 el esfuerzo de diseño máximo será:

$$\sigma_d = S_y/N$$
$$\sigma_d = 276 \text{ MPa}/3 = 184 \text{ MPa}$$



**Figura 2.8: Esquema de fuerzas y momentos para el husillo de bolas del eje “Z”.**

Con el análisis de fuerzas y el diagrama de momentos realizado en la figura 2.8 tenemos que  $M = 53162.65 \text{ N}\cdot\text{mm}$ , por tanto el valor del módulo de la sección transversal está dado por:

$$S = M/\sigma_A$$

$$S = 289 \text{ mm}^3$$

El diámetro teórico del husillo de bolas deberá ser:

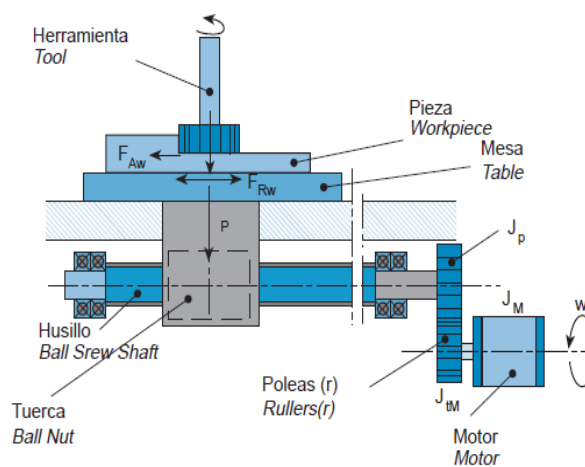
$$D = \sqrt[3]{\frac{32 * S}{\pi}}$$

$$D = 15 \text{ mm}$$

Se seleccionó el Husillo de Bolas para el eje “Z” de un diámetro de 20 mm y de paso 5mm, debido a que en el mercado nacional este diámetro es el más manufacturado en material acero plata (K510 de Aceros Bohler).

**c. Cálculo del torque para la estructura del eje “Z”.**

La distribución de fuerzas e inercias sobre una meza de mecanizado se observan en la siguiente figura 2.9.



**Figura 2.9: Fuerzas e Inercias en un ejemplo de mesa de mecanizado.**

FUENTE: (Mena A. , 2013, pág. 48)

Todos los valores y las ecuaciones para los siguientes cálculos serán tomados de (KORTA S.A, pág 58), partiendo del torque total ( $T_{tot}$ ) que debe proporcionar el motor para el movimiento del husillo y viene dado por:

$$T_{tot} = r * T_E + T_D \quad Ec. 2.10$$

Dónde:  $T_E$  = Par Estático [N.m]

$T_D$  = Par Dinámico [N.m]

r = Relación de Poleas

El torque estático ( $T_E$ ) se calcula por la siguiente ecuación:

$$T_E = T_{pr} + T_L + T_{rod} \quad Ec. 2.11$$

Dónde:  $T_{pr} = 0$  (Par de precarga en husillos de bolas)

$T_L$  = Par que deberá soportar el motor debido a la carga.

$T_{rod} = 34.32 \times 10^{-3}$  N-m (Par de fricción rodamientos de apoyo)

El par que soporta el motor  $T_L$  está dado por:

$$T_L = \frac{F_A * P_h * 10^{-3}}{2\pi * n_p} \quad Ec. 2.12$$

Dónde:  $F_A$  = Carga axial soportada por el husillo (N)

$P_h = 5$  mm (Paso del husillo de bolas)

$n_p$  = Eficiencia práctica

Debemos encontrar el valor de la carga axial  $F_A$  con la ecuación:

$$F_A = F_L + u_s(F_V + F_P) \quad Ec. 2.13$$

Dónde:  $F_L$  = Carga en dirección del eje del husillo soportada por la mesa (nulo para este eje)

$F_V$  = Carga vertical soportada por la mesa (peso Estructural)

$F_P$  = Carga en la dirección perpendicular al movimiento (Fuerza de Corte).

$u_s = 0.3$  Coeficiente de rozamiento de las guías cola de Milano

$$F_A = 0.3(163.86 \text{ N} + 375 \text{ N}) = 161.66 \text{ N}$$

Para encontrar la eficiencia práctica  $n_p$  empleamos la ecuación:

$$n_p = n_t * 0.9 \quad Ec. 2.14$$

La eficiencia teórica  $n_t$  viene dada por:

$$n_t = \frac{1}{1 + \frac{\pi d_0}{P_h} * u_c} \quad \text{Ec. 2.15}$$

Dónde:  $d_0$  = Diámetro nominal el eje del husillo.

$u_c$  = 0.006 (Coeficiente de fricción del husillo).

$$n_t = \frac{1}{1 + \frac{\pi(16)}{5} * 0.006} = 0.943$$

La eficiencia práctica se obtiene con la ecuación 2.14:

$$n_p = 0.943 * 0.9 = 0.849$$

Encontramos el valor de  $T_L$  con la ecuación 2.12:

$$T_L = \frac{(161.66 N)(5 mm) 10^{-3}}{2\pi(0.849)} = 0.152 Nm$$

Con los valores obtenidos calculamos el torque estático  $T_E$  con la Ecuación 2.11:

$$T_E = 0 + 0.152 Nm + 34.32 \times 10^{-3} Nm = 0.186 Nm$$

Ahora se a calcular el torque dinámico con la ecuación:

$$T_D = \bar{\omega} * J_S \quad \text{Ec. 2.16}$$

Dónde:  $\bar{\omega}$  = Aceleración angular motor

$J_S$  = Inercia total de la estructura

La inercia total  $J_S$  se calcula mediante la sumatoria de las inercias del motor, husillo, reductor y de la mesa:

$$J_S = J_{MOTOR} + r(J_{HUSILLO} + J_{REDUCTOR} + J_{MESA}) \quad \text{Ec. 2.17}$$

La inercia del husillo de bolas se obtiene por:

$$J_{HUSILLO} = (\pi * L * \rho * d^4) \div 32 \quad \text{Ec. 2.18}$$

Dónde:  $L$  = Longitud del husillo de bolas (0.172m)  
 $\rho$  = Densidad del material del husillo de bolas (7700kg/m<sup>3</sup>)  
 $d$  = Diámetro del husillo de bolas (0.016m)

$$J_{HUSILLO} = (\pi(0.172m) * (7700kg/m^3) * (0.016m)^4) \div 32$$

$$= 8.521 \times 10^{-6} Kg m^2$$

La inercia de la mesa viene dada por:

$$J_{MESA} = \frac{m \left( \frac{P_h}{2\pi} \right)^2 * 10^{-6}}{n_p} \quad Ec. 2.19$$

Dónde:  $m$  = Masa del husillo de bolas (0.52Kg)

$$J_{MESA} = \frac{(0.52Kg) \left( \frac{5mm}{2\pi} \right)^2 * 10^{-6}}{0.849} = 3.878 \times 10^{-7} Kg m^2$$

La inercia del motor obtenemos de la hoja de datos del mismo (ANEXO B)

$$J_{MOTOR} = 2.7 \times 10^{-5} Kg m^2.$$

Calculamos la inercia total  $J_s$  de la estructura con la ecuación 2.17:

$$J_s = 2.7 \times 10^{-5} Kg m^2 + 1(8.521 \times 10^{-6} Kg m^2 + 0 + 3.878 \times 10^{-7} Kg m^2)$$

$$J_s = 3.59088 \times 10^{-5} Kg m^2$$

El torque dinámico ( $T_D$ ) obtenemos con la ecuación 2.16

$$T_D = \left( 2513.27 \frac{rad}{seg^2} \right) \left( 3.59088 \times 10^{-5} \frac{Kg}{m^2} \right) = 0.090 Nm$$

Por último con la ecuación 2.10 obtenemos el torque total ( $T_{tot}$ ):

$$T_{tot} = 1(0.186 Nm) + 0.090 Nm = \mathbf{0.276 Nm}$$

#### 2.2.4. Diseño del sistema mecánico para el movimiento del eje rotativo A.

En la figura 2.10 se aprecia el diseño mecánico para el movimiento rotativo del eje "A", El movimiento que desempeña este eje es de giratorio, por ello el principal sistema mecánico que permite acoger el movimiento rotatorio de un actuador y transmitir movimiento rotatorio a la estructura es el de sin fin - corona (mesa rotativa). La ubicación para este sistema es de forma vertical. Tiene como apoyo para la rotación de la estructura A un soporte que trabaja como apoyo.

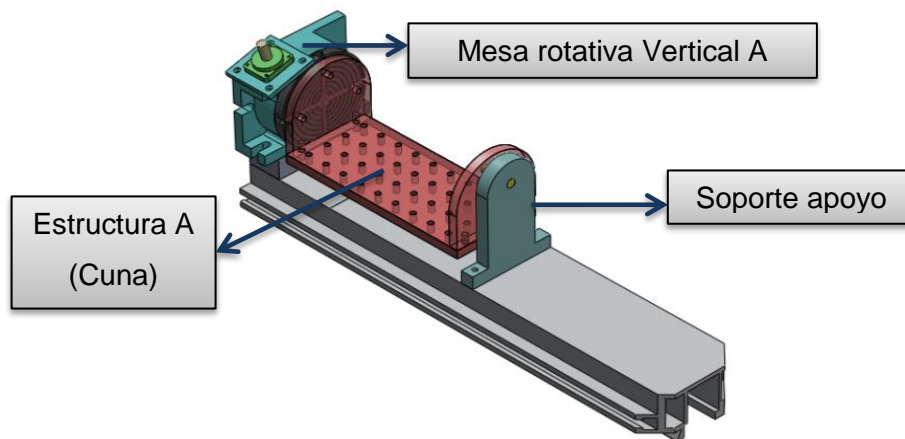
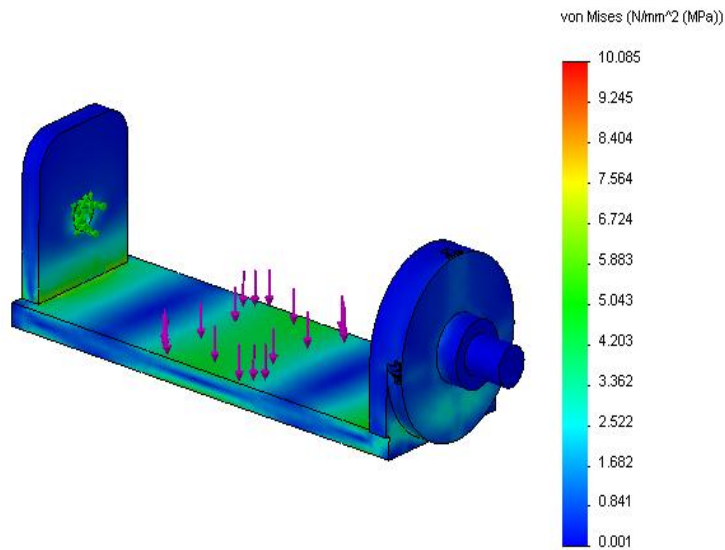


Figura 2.10: Mecanismo de movimiento del eje "A"

##### a. Cálculo de la estructura del eje "A" (Cuna)

El cálculo de la estructura se basará en el análisis estático producido por las cargas que soportará la estructura, el peso de la estructura del eje "Z" más la fuerza de corte. En la figura 2.11 se muestra el análisis estático realizado con SolidWorks, el cual muestra la escala de Von Mises con el máximo esfuerzo que soportará el material.



**Figura 2.11: Escala de tensiones según el criterio de Von Mises.**

Como deformación máxima tenemos 10,085 MPa. El material de la estructura es Aleación de Aluminio 5052-H34 ( $S_y = 90 \text{ MPa}$ ), y un factor de seguridad de 3 (Mott, 2006, pág. 185), con lo que verificamos que se cumple la ecuación de diseño 2.7.

$$\sigma' < \sigma_d$$

$$10 \text{ MPa} < 30 \text{ MPa}$$

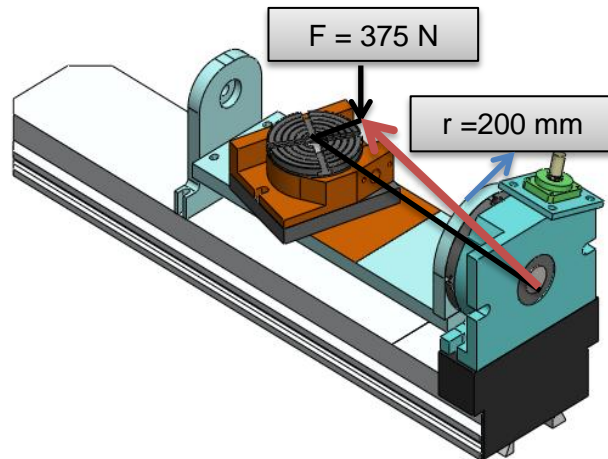
Se cumple la ecuación de diseño, y se tiene un sobredimensionamiento del espesor de la placa para los tres elementos de esta estructura de 13mm de espesor, debido a que en el laboratorio de la Universidad de las Fuerzas Armadas-Espe Extensión Latacunga cuenta con una plancha de aluminio de 13mm de espesor.

**b. Cálculo de la transmisión de movimiento rotativo sin fin – corona para el eje “A”.**

Para el eje rotativo A es necesario conocer el torque que debe vencer este al momento de mecanizar para mantenerse en equilibrio. Como la fuerza de corte en el fresado se genera con la punta de la fresa en la



estructura, es considerada puntual y se analiza el máximo torque que genera en la estructura A como se observa en figura 2.12.



**Figura 2.12: Fuerza puntual en el eje "A".**

La fuerza puntual indicada  $F = 375 \text{ N}$ , hace referencia a la fuerza de corte para el mecanizado más una fuerza adicional dada por la estructura. El torque generado se lo calcula con el producto de la fuerza en Newton por la distancia o radio en metros de la fuerza al eje de rotación como en la ecuación 2.20.

$$T = r \times F \quad \text{Ec. 2.20}$$

$$T = 0.2 \text{ m} \times 375 \text{ N}$$

$$T = 75 \text{ Nm}$$

Por lo que es necesario utilizar un reductor de velocidad con la finalidad de aumentar el torque del actuador que mueve a este eje y es de  $2 \text{ Nm}$ . Por esto la selección por geometría de la máquina es el mecanismo Sin Fin – Corona. Para calcular la relación de transmisión necesaria se emplea la ecuación 2.21 (Mott, 2006, pág. 552).

$$i = \frac{e_1}{Z_2} = \frac{T_i}{T_o} \quad \text{Ec. 2.21}$$

Dónde:

$i$ : Relación de transmisión. (Incrementa torque)

$e_1$ : Número de entradas del tornillo sin fin (Generalmente 1).

$Z_2$ : Número de dientes de la corona.

$T_i$ : Torque de entrada (en el Sin Fin).

$T_o$ : Torque de salida (en la corona) [N.m].

El torque a la entrada es de 2 N.m, este es un torque de diseño, por lo que se tiene una relación de transmisión:

$$i = \frac{T_i}{T_o} = \frac{2 Nm}{75 Nm} = 0.027$$

El número de dientes de la corona debe ser aproximadamente de:

$$Z_2 = \frac{e_1}{i} = \frac{1}{0.027} = 37 \text{ Dientes}$$

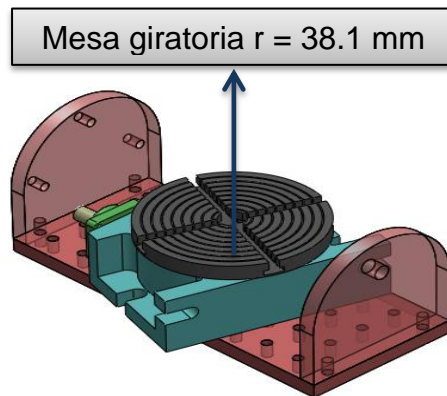
El número de dientes de la corona se selecciona de 36 dientes, esto se justifica por la estandarización existente en el mercado de este reductor y basándose en sus dimensiones.

Nota: las partes de este mecanismo reductor se especifican en el ANEXO A.

### **2.2.5. Diseño del sistema mecánico para el movimiento del eje rotativo C.**

En la figura 2.13 se aprecia el diseño mecánico para realizar el movimiento rotativo del eje "C", el movimiento que realiza es rotativo y

para desempeñar esta función de igual manera que en el eje “A”, se implementa un sistema mecánico de Sin Fin - Corona (mesa rotativa) pero posicionada de forma horizontal.



**Figura 2.13: Mecanismo de movimiento del eje “A”**

**a. Cálculo de la transmisión de movimiento rotativo sin fin – corona para el eje “C”.**

La fuerza puntual es de  $F = 400\text{ N}$ , el torque generado se lo calcula con el producto de la fuerza en Newton por la distancia o radio en metros de la fuerza al eje de rotación en este caso  $r = 0.04\text{ m}$  (radio de la mesa eje “C”), aplicando la ecuación 2.20 tenemos.

$$T = r \times F$$

$$T = 0.04\text{ m} \times 400\text{ N}$$

$$T = 15.24\text{ Nm}$$

La relación de transmisión según la ecuación 2.21 es:

$$i = \frac{e_1}{Z_2} = \frac{T_i}{T_o}$$

Dónde:

$i$ : Relación de transmisión. (Incrementa torque)

$e_1$ : Número de entradas del tornillo sin fin (Generalmente 1).

$Z_2$ : Número de dientes de la corona

$T_i$ : Torque de entrada (en el Sin Fin)

$T_o$ : Torque de salida (en la corona) [N.m]

El torque a la entrada es de 0.9 N.m, este es un torque de diseño, por lo que se tiene una relación de transmisión:

$$i = \frac{T_i}{T_o} = \frac{0.9 Nm}{15.24 Nm} = 0.05$$

El número de dientes de la corona debe ser aproximadamente de:

$$Z_2 = \frac{e_1}{i} = \frac{1}{0.05} = 20 \text{ Dientes}$$

Se optó por una transmisión con una corona de 36 dientes, debido a que en el mercado se adquirió una mesa rotativa con esas características físicas y mecánicas, y cumplen con la relación de transmisión deseada.

### 2.2.6. Descripción del sistema mecánico cabezal fresador.

En la figura 2.14 se observa el sistema mecánico del cabezal fresador el cual está constituido de una transmisión de engranes – banda síncrona, para el movimiento del husillo.

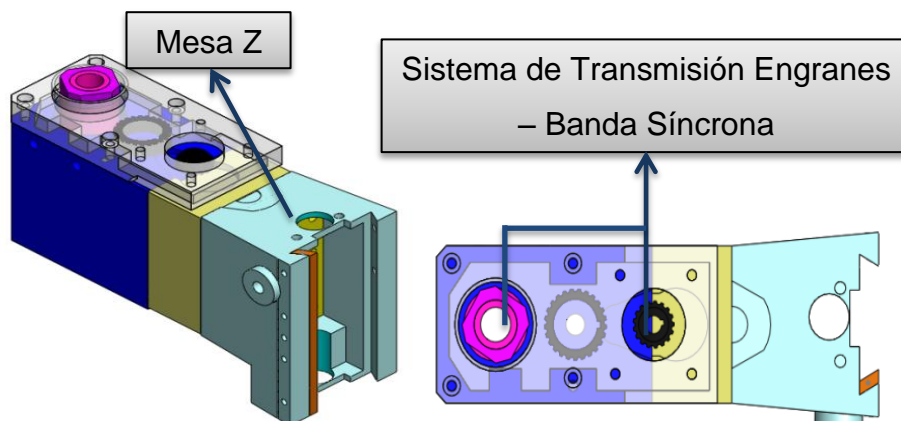


Figura 2.14: Mecanismo del cabezal fresador

### 2.2.7. Acople entre actuadores y mecanismos de transmisión.

El acople de quijadas permite transferir el movimiento de un eje de entrada a uno de salida dando cierta flexibilidad cuando existe desalineación angular para evitar daños, como se muestra en la figura 2.15.

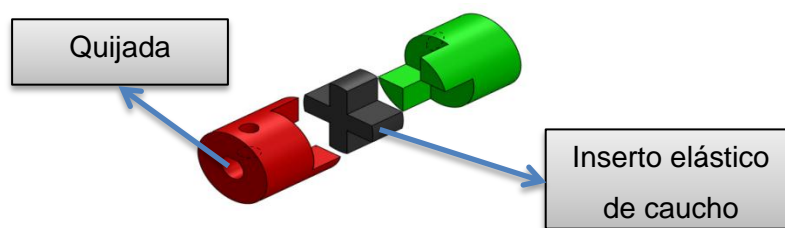


Figura 2.15: Acoplamiento flexible de quijadas

### 2.3 DESCRIPCIÓN DE LOS MOTORES PARA EL PROTOTIPO.

De acuerdo a la sección 1.1.4 se decide mantener los motores de la marca QuickSilver Controls QCI-23K-3 ya que satisfacen las características mecánicas requeridas como el torque calculado para mover las estructuras de cada eje principal “X”, “Y”, “Z”, y los ejes rotativos “A”, “C” a continuación se muestra sus características técnicas:

Tabla 2.2: Características técnicas del motores a pasos.

FUENTE: (QuickSilver Controls, 2010)

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SERVOMOTOR	
Características	Motor 23-3
Velocidad Máxima (RPM)	2000
Velocidad Óptima a 48V (RPM)	500
Torque a la Velocidad Óptima (oz-in/ N-m)	110 0.78
Torque Continuo (oz-in / N-m)	125 0.88
Potencia Pico (Watts)	47
Inercia del Rotor (oz-in <sup>2</sup> /Kg-m <sup>2</sup> )	1.36 2.5E-5
Corriente de Entrada Máxima (Amperios-DC)	3.0

Nota: las características físicas, mecánicas y eléctricas de estos actuadores se especifican en el ANEXO B.

## 2.4 DESCRIPCIÓN DEL MOTOR PARA EL HUSILLO DEL CABEZAL

El cálculo de la potencia requerida para efectuar un mecanizado con el prototipo de fresadora vertical de 5 ejes CNC, se lo realiza con la siguiente ecuación 2.22 de potencia de corte:

$$P_m = F_c * V_c \quad \text{Ec. 2.22}$$

La fuerza de corte es de 375 Nm y la velocidad de corte se restringe al máximo número de revoluciones que tiene el motor y su juego de engranes del prototipo original cuando trabaja en alta velocidad, y es  $n = 2900$  RPM, por lo que la velocidad de corte máxima para el prototipo es de 0.911 [m/s].

La potencia mecánica o neta es:

$$P_m = 341.63 [W] \approx 0.46 [hp]$$

Si se considera que el rendimiento ( $\eta$ ), de un motor es del 80% la potencia eléctrica ( $P_e$ ), necesaria del motor para el cabezal deberá ser (Pareto, 1976, pág. 104)

$$P_e = \frac{P_m}{\eta} \quad \text{Ec. 2.23}$$

$$P_e = \frac{341.63 W}{0.8} = 427.04 W$$

Por lo que se mantiene el motor DC CHUG HSIWCO.LTDA. Original del prototipo de partida (IRON HAND CH-350LMA) de 500 W, 90 VDC, 3.5 A y 4000 RPM.

### CAPÍTULO III

## DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL PROTOTIPO DE FRESADORA VERTICAL DE 5 EJES.

El prototipo de fresadora vertical de 5 ejes CNC tendrá como aplicación las diferentes operaciones de fresado superficial y complejo en materiales de baja dureza como madera, acrílico y aluminio. Para coordinar el funcionamiento exitoso del prototipo se diseña y selecciona todos los componentes para el sistema de control y considerando que los elementos finales de control son motores a pasos, y un motor DC descritos en la sección 2.3 y sección 2.4 respectivamente para los que se gobernara su accionamiento, posición, velocidad y aceleración. En la figura 3.1 se muestra el esquema general de control para máquinas CNC que consta de la programación CAD/CAM, el controlador y el sistema electromecánico del prototipo de fresadora vertical de 5 ejes.

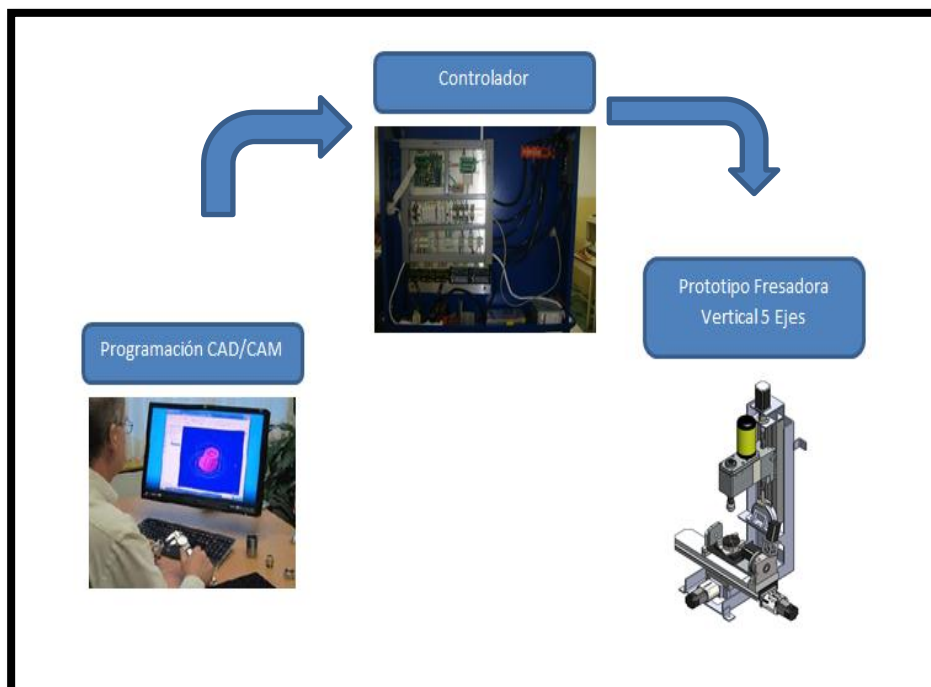


Figura 3.1: Esquema general del control

### **3.1 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA EL SISTEMA DE CONTROL DEL PROTOTIPO DE FRESADORA VERTICAL DE 5 EJES CNC.**

El sistema de control de la fresadora vertical de 5 ejes CNC consta de las siguientes partes:

- Sistema electrónico de control.
- Sistema eléctrico de control.
- Software de control.
- El HMI (interfaz humano máquina).
- Comunicación.

Se optó por conservar el sistema de control original del prototipo de fresadora vertical de 3 ejes CNC sección 1.1.4 para los ejes principales de movimiento lineal X, Y, Z, y se adicionara el uso de un puerto de comunicación en conjunto con una tarjeta CNC más dos drivers para motores a pasos, con la finalidad de controlar el movimiento de dos ejes rotativos A y C.

El sistema de control electrónico está constituido por los siguientes elementos: dos tarjetas CNC, drives de control para cinco motores a pasos, una tarjeta controladora de velocidad para un motor DC, y un circuito acondicionador de voltaje.

El sistema de control eléctrico está constituido por los siguientes elementos: dos fuentes de alimentación para cinco motores a pasos, una fuente de alimentación para el circuito acondicionador de voltaje, una fuente de alimentación para una tarjeta CNC, elementos eléctricos de control, elementos de protección eléctrica, y elementos para conexionado eléctrico (cableado).

El software de control permite el manejo manual o automático del prototipo, utilizando para esto un ordenador de escritorio.



En el HMI del prototipo deberá visualizarse: la ejecución de los códigos G, el tiempo total de la operación de mecanizado, el desplazamiento de los ejes, una pantalla para el movimiento de los ejes en forma manual.

La comunicación para software de control y las tarjetas principales CNC debe ser bidireccional, es decir que permita recibir y enviar datos.

### 3.1.1. Parámetros de diseño y selección de los elementos del sistema electrónico de control.

#### a. Tarjetas CNC.

En la figura 3.2 se aprecia un diagrama de bloques que indica que el sistema de control del prototipo será a lazo abierto, por lo que es necesario utilizar dos tarjetas controladoras CNC. Una tarjeta principal la cual deberá comunicarse con el ordenador, con los tres drivers de los motores de los ejes X, Y y Z, y a su vez con una tarjeta de control de velocidad para el motor del husillo. Una segunda tarjeta principal que permitirá la comunicación con el ordenador y a su vez con los dos drivers de los motores de los ejes A y C. Estas dos tarjetas principales deben controlar los pulsos de paso y dirección para manipular el funcionamiento de los cinco drivers que controlan el movimiento de los motores X, Y, Z, A y C.

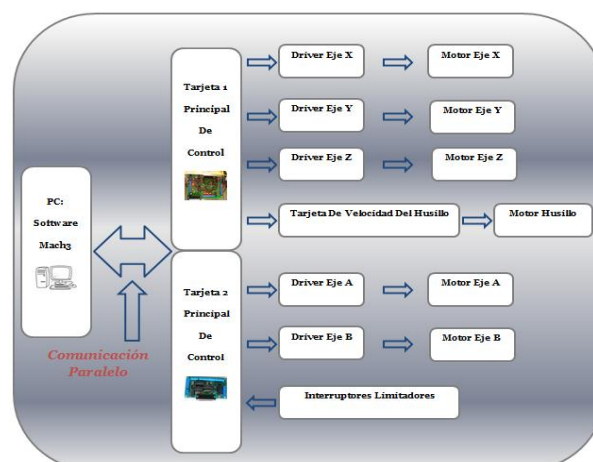


Figura 3.2: Diagrama de bloques de las tarjeta controladoras

Para el uso CNC existen diferentes tarjetas electrónicas de las marcas Combo Board Rev.5, Motion Card, Probotix, Homann Designs, CNC 4PC, Toshiba, CNC-DB25, etc., que cumplen con el control de hasta 5 ejes, con excelentes características de funcionamiento y costos moderados, por ende accesibles para este prototipo. En la tabla 3.1 se enlista tres distintos tipos de tarjetas CNC de similares características y compatibles con el mismo software de control.

**Tabla 3.1 Características de diferentes tarjetas CNC**

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>PC-2-Route Modelo M2 Rev.8</b>	<b>Combo Board Rev.5</b>	<b>CNC-DB25</b>
<b>COMUNICACIÓN</b>	Puerto Paralelo	Puerto Paralelo	Puerto Paralelo
<b>SOFTWARE COMPATIBLE</b>	Mach2 y Mach3	Mach3 OEM	Mach2 Mach3
<b>EJES DE CONTROL-PARA COORDENADAS</b>	X-Y-Z-A	X-Y-Z-A	X-Y-Z-A-B
<b>CONTROL DE LIMIT SWITCH-PARA COORDENADAS</b>	X-Y-Z-A	X-Y-Z-A	X-Y-Z-A-B
<b>CONTROL DE HOME SWITCH-PARA COORDENADAS</b>	X-Y-Z-A	X-Y-Z-A	X-Y-Z-A-B
<b>CONTROL DE VELOCIDAD DEL HUSILLO</b>		SPLINDE CONTROL	
<b>CONTROL DE BOMBA DE REFRIGERANTE</b>		RELÉ DE CONTROL	

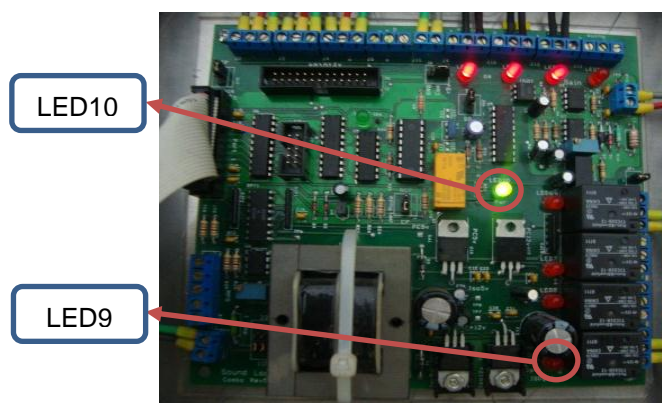
Como se aclaró en la sección 3.1 que el sistema de control para los ejes principales X, Y y Z, y el control de velocidad del husillo se mantendrá del prototipo original, se selecciona la tarjeta Combo Board Rev.5, y para el control de los dos ejes rotativos A y C se seleccionó la tarjeta CNC-DB25, se justifica la selección de esta última tarjeta ya que es accesible en

el mercado y solo gobernará los motores de los ejes A y C, sin necesidad de que posea relés de control.

### **Descripción de la tarjeta Combo Board Rev.5.**

Esta tarjeta permite controlar hasta 4 ejes de movimiento para esto utiliza señales de pulso de paso y dirección para drivers de motores DC. Tiene un relé auxiliar, dos relés para el encendido e inversión de giro del motor del husillo y un relé para la activación de una bomba utilizada en un sistema de refrigeración. Para variar la velocidad del husillo la tarjeta combo board rev.5 acepta señales de paso y dirección y las convierte en señales de voltaje analógico en un rango de 0V a 5V ó 0V a 10V. La comunicación de esta tarjeta al ordenador es por un puerto paralelo DB25. Tiene 4 entradas para switches limitadores de carrera.

En la figura 3.3 se observa la vista superior de la tarjeta combo board rev.5; los elementos de verificación del funcionamiento de la tarjeta son los LED9 y LED10; de los cuales el LED9 se enciende para mostrar que la tarjeta está encendida, esto se logra siempre que los Limit Switch, Home Switch y Stop no estén activos; y el LED10 se enciende cuando la tarjeta está habilitada.



**Figura 3.3: Vista superior de la tarjeta combo board rev. 5.**

La tarjeta combo board rev. 5 tiene diferentes terminales para la conexión detalladas en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Terminales de conexión de la tarjeta combo board rev. 5.**

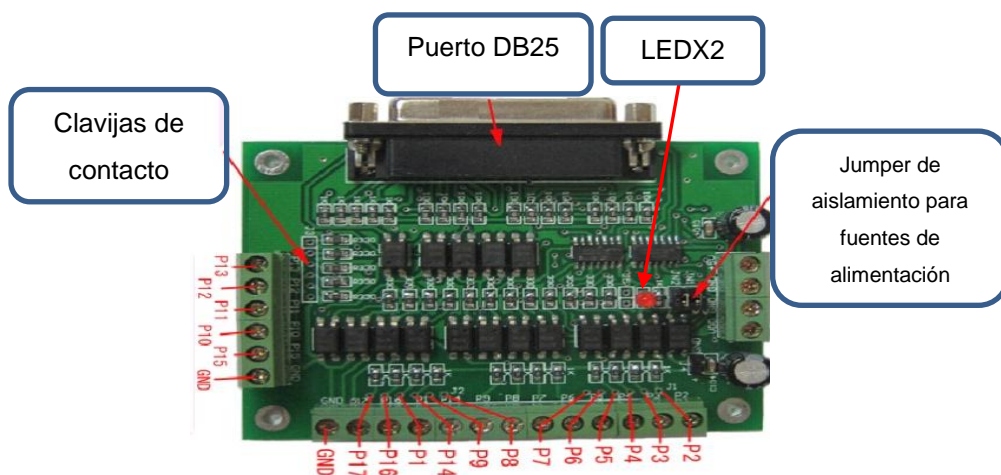
BORNERA	TERMINAL	CONEXIÓN
J2 a J5	COM, Step, Dir	Señales para los driver X, Y, Z
J6	GND, COM, +5	Para los Gecko drive debe unirse COM y +5
J7	Puerto Paralelo	Conexión con el puerto paralelo
J16	S, COM, SS	Conectar entre S y COM para habilitar a los relés
J17 a J20	NC, Run, NO	Salidas a relés
J21	220/110	Entrada alimentación VAC
J24	1,2,3,4,COM	Conectar 1 con COM y 2 con COM en paralelo para Habilitar 110VAC
TP3 y TP9	(+) y (-)	Conectar al voltímetro para fijar la señal de salida J1

Más características técnicas de esta tarjeta se detallan en el ANEXO E.

### Descripción de la tarjeta CNC-DB25.

Esta tarjeta permite controlar hasta 5 ejes de movimiento para esto utiliza señales de pulso de paso y dirección para drivers de motores DC, se comunica con el ordenador mediante un puerto paralelo DB25, tiene 5 entradas para switches limitadores de carrera, no tiene relés de control.

En la figura 3.4 se indica la vista superior de la tarjeta CNC-DB25, el elemento de verificación del funcionamiento de la tarjeta es el LEDX2 que se encenderá siempre que la tarjeta esté energizada.



**Figura 3.4: Vista superior de la tarjeta CNC-DB25**

FUENTE: (Technology Inc, 2011)

La tarjeta tiene diferentes terminales de conexión detallados en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3. Terminales de conexión de la tarjeta CNC-DB25**

<b>PINES</b>	<b>TERMINAL</b>	<b>CONEXIÓN</b>
P1-P17	COM, Step, Dir	Señales para los driver A y C
DB25	Puerto Paralelo	Conexión con el puerto paralelo
P10-P11-P12- P13-P15 Limit/Home Inputs	+5V, Sig, Gnd	Conexiones en Paralelo entre los Limit Y Home Switch
P18-P25	GND	Tierra
+5VDC	5VDC	Fuente de poder

Esta tarjeta permite controlar hasta 5 motores a pasos, es compatible con el software KCAM4, MACH2/3 y EMC2, su comunicación a la PC es por un puerto paralelo.

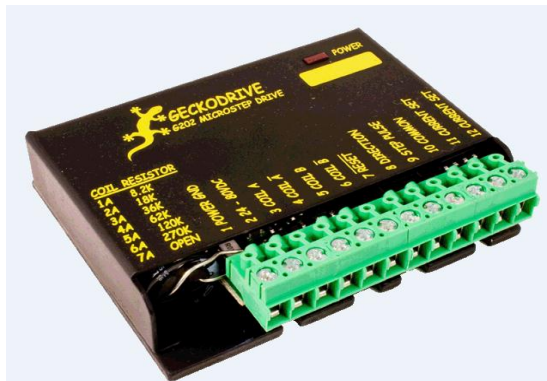
Más características técnicas y de funcionamiento de esta tarjeta se muestran en el ANEXO F.

**b. Drivers de control para motores a pasos.**

Entre los principales controladores para motores a pasos se detallan los siguientes:

**La tarjeta Gecko Driver G202.**

La tarjeta Gecko Driver G202 (figura 3.5) es capaz de controlar motores paso a paso, y tiene un rango de operación para la corriente del motor que oscila desde 1A a 7A, mientras que su consumo de corriente es de 15mA ver ANEXO G.



**Figura 3.5: Tarjeta Gecko Drive G202.**

FUENTE: (Geckodrive, 2008)

Es la encargada de recibir y procesar la información que envía la tarjeta principal, para luego enviar pulsos o señales de control hacia los motores paso a paso.

La G202 está protegida contra cortocircuitos de los bobinados del motor, es decir de un bobinado del motor a otro bobinado y del bobinado a tierra. La G202 también está protegida contra fallas en las conexiones o mala distribución de las fases en los motores; esto normalmente ocurre cuando los bobinados de un motor se conectan incorrectamente, para la configuración en serie o paralelo; además está protegida contra cortocircuitos entre un bobinado y el positivo de la fuente.

No existe ninguna protección contra la polaridad de la fuente invertida, contra voltajes que excedan los 80VDC y el límite máximo de temperatura que es de 70 °C. También se recomienda no conectar o desconectar el motor mientras la G202 se encuentra encendida, un led indicador muestra si la tarjeta controladora está encendida o no.

Cuando una condición de cortocircuito es encontrada la G202 entra en protección shutdown apagando las bobinas de salida. Las salidas de la G202 permanecen en shutdown hasta que la fuente sea apagada y descargada, entonces se enciende nuevamente. En caso de que se active

dicha protección se debe verificar las conexiones eléctricas y los cables de alimentación al motor.

### **La tarjeta Microstepping Driver KL-4030**

La tarjeta KL-4030 figura 3.6 es adecuada para una amplia gama de motores a paso Nema 23, tiene un rango de operación para la corriente del motor que oscila desde 0.9A a 3A amperios, mientras que su consumo de corriente es de 16mA ver ANEXO H.



**Figura 3.6: Tarjeta KL-4030**

FUENTE: (Kelinginc, 2010)

Es la encargada de recibir y procesar la información que envía la tarjeta principal para luego enviar pulsos o señales de control hacia los motores paso a paso. Cuenta con protecciones de sobre carga, corto circuito y por sobrepaso de temperatura.

Los controladores originales de la máquina son las tarjetas Gecko Driver para los ejes principales X, Y y Z, por lo que se optó por conservarlos, mientras que para los ejes A y C se seleccionó los controladores KL-4030, se justifica esta selección debido a que son accesibles en el mercado, su costo es razonable, son compatibles con las tarjetas principales CNC, tienen buenas características de protección y funcionamiento.

### c. Tarjeta controladora de velocidad del motor DC.

Las características del motor DC sección 2.4 determinan los parámetros de funcionamiento de la tarjeta controladora de velocidad, esta deberá tener un voltaje de alimentación de 110 VAC, y entregar un voltaje de salida de hasta 90 VDC y una corriente de 3.5A. De acuerdo a estos requerimientos se selecciona la tarjeta LM-1HP.

#### Tarjeta LM-1HP.

El voltaje de entrada de alimentación es de 110VAC, el voltaje de salida para el motor DC varía de 20VDC a 80VDC gracias a un voltaje de control analógico de 1.7 VDC a 3.7VDC generada por un potenciómetro, y la corriente de salida es de 3.5A (figura 3.7).



Figura 3.7: Tarjeta LM-1hp control de PWM

Las características de los terminales de la tarjeta se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Terminales tarjeta LM-1HP

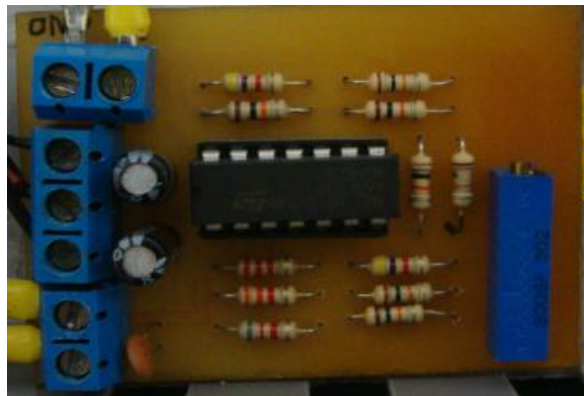
Terminal	Descripción
L – N	Alimentación 110 Va
M+ M-	Salida motor DC
P1 – P2 – P3	Control de voltaje



Para variar automáticamente el voltaje de control analógico se reemplazará al potenciómetro por una entrada analógica que nos proporciona la tarjeta principal combo board rev.5.

#### **d. Circuito acondicionador de voltaje.**

Este circuito permite acondicionar la señal analógica de la tarjeta combo board rev.5 de 0VDC a 1.7VDC y de 5VDC A 3.7VDC, para la entrada del voltaje de control de la tarjeta LM-1HP. El voltaje de alimentación de este circuito es de  $\pm 5$ VDC (figura 3.8).



**Figura 3.8: Circuito acondicionador de voltaje.**

### **3.1.2. Parámetros de diseño y selección de los elementos del sistema eléctrico de control.**

#### **Fuentes de alimentación.**

Las fuentes de alimentación deben satisfacer las siguientes características de funcionamiento:

#### **Fuente 1 tensión de alimentación de tres motores QCI-23K-3.**

Esta fuente debe satisfacer la alimentación para tres motores a pasos QCI-K3-3 que necesitan un voltaje de 48 voltios en corriente continua y un amperaje de 3 amperios por bobina para su funcionamiento óptimo. Los parámetros de esta fuente son:

Voltaje de entrada: 110 VAC

Voltaje de salida: 48 VDC

Corriente de salida: 12 A

### **Fuente 2 tensión de alimentación para el circuito acondicionador.**

Esta fuente debe ser bipolar no regulada de  $\pm 5$ VDC para alimentar al circuito acondicionador de voltaje. Los parámetros de esta fuente son:

Voltaje de entrada: 110VAC

Voltaje de salida:  $\pm 5$ VDC

Corriente de salida: 150mA

### **Fuente 3 tensión de alimentación de dos motores QCI-23K-3.**

Esta fuente debe satisfacer la alimentación de dos motores a pasos QCI-23K-3 que necesitan un voltaje de 36 voltios de corriente continua y 3 amperios por bobina. Los parámetros de esta fuente son:

Voltaje de entrada: 110VAC

Voltaje de salida: 36VDC

Corriente de salida: 6A

### **Fuente 4 tensión de alimentación la tarjeta CNC-DB25.**

Esta fuente alimentara a la tarjeta CNC-DB25 y debe cumplir las siguientes características de funcionamiento:

Voltaje de entrada: 110VAC

Voltaje de salida: 5VDC (lineales)

Corriente de salida: 150mA

La tabla 3.5 muestra las características de las fuentes de alimentación seleccionadas.

**Tabla 3.5 Características de las fuentes de alimentación**

<b>Fuente</b>	<b>Voltaje de entrada VAC</b>	<b>Voltaje de salida VDC</b>	<b>Corriente de funcionamiento DC</b>	<b>Observaciones</b>
1	110	48	15A	Existente No regulado
2	110	±5	150mA	Existente Bipolar No regulado
3	110	36	10A	Marca WFINTRI no regulado
4	110	5	150mA	Existe no regulada

### **Elementos eléctricos de control.**

Para el encendido del sistema eléctrico se necesita una botonera que cuente con un pulsador de encendido ON y un pulsador de apagado OFF.

Un relé K1 para el encendido de las cuatro fuentes de alimentación y las tarjetas principales CNC, dos relés K2 y K4 que encienden las tarjetas Gecko Driver G202 y KL-4030, un relé K3 para el encendido de la tarjeta de control de velocidad del husillo; estos relés deben funcionar con 110VAC y sus contactos deben soportar hasta 10A.

Como protección para evitar daños en el sistema mecánico del prototipo el sistema eléctrico cuenta con un paro de emergencia PE (interruptor tipo hongo) el cual deshabilita el sistema de control.

Para mostrar que el prototipo se encuentra en funcionamiento se deberá encender una lámpara de color verde L1, cuando se encienda el husillo se deberá encender una lámpara de color naranja L2, y cuando el paro de emergencia se encuentre activado se encenderá una lámpara de color rojo L3, estas lámparas deberán funcionar con un voltaje de 110VAC.

Para el control del posicionamiento del home y sobrepaso de límites de recorrido mecánicos del prototipo, se necesita por cada eje principal dos

sensores de contacto (X+ X-, Y+ Y-, Z+ Z-), y para cada eje rotativo un sensor de contacto (A Home, C Home) que funcionen con 5VDC.

Nota: Estos elementos se encuentran representados en el plano eléctrico ANEXO D.

En la tabla 3.6 se detalla las características de selección de todos los elementos eléctricos para el control del prototipo.

**Tabla 3.6 Características de elementos eléctricos**

<b>Elemento</b>	<b>Cant.</b>	<b>Vi [V]</b>	<b>Corriente en contactos [A]</b>	<b>Estado de los contactos</b>	<b>Observación</b>
Pulsadores	2		Hasta 10	NC, NO	
Relés	4	110 VAC	Hasta 10	NC, NO	4 contactos por relé
Interruptor	1		Hasta 10	NC, NO	Tipo hongo
Lámparas	3	110 VAC	Hasta 10		Una verde, una roja, una naranja
Finales de carrera	8	5 VDC	Hasta 10	NC, NO	Mecánicos

#### **Elementos de protección eléctrica.**

Para la protección por corto circuito de la tarjeta Gecko Driver G202 se considera la corriente nominal del motor QCI-23K-3 que es de 3A más la corriente de funcionamiento de este driver que es de 15mA con un total de 3.015A. Para la protección por corto circuito de la tarjeta KL-4030 se debe considerar la corriente nominal del motor QCI-23K-3 que es de 3A más la corriente de funcionamiento de este driver que es de 16mA dando un total de 3.016A. Por lo cual se seleccionan fusibles con un valor de 4A con su respectivo porta-fusibles.

Para la protección de la tarjeta LM-1HP contra cortocircuitos se considera la corriente nominal del motor DC CHUG HSIWCO.LTDA que es de 3.5A.

Por lo tanto se selecciona un fusible con valor de 4A con su respectivo porta-fusibles.

Para la protección por cortocircuito y sobre carga del sistema eléctrico de control se suman las corrientes de las cuatro fuentes de alimentación que es igual a 24.3A. Por lo que se selecciona un interruptor magneto-térmico con un valor de 32A.

En la tabla 3.7 se enlista los elementos de protección eléctrica para el sistema de control.

**Tabla 3.7 Características de elementos eléctricos**

Elemento	Cant.	Corriente [A]	Observación
Fusibles	6	4	Valor estándar
Porta fusibles	6	32	Valor estándar
Interruptor magneto-térmico	1	32	Valor estándar

### Elementos de conexionado eléctrico.

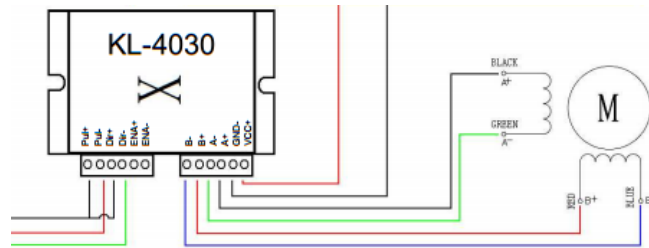
Para dimensionar el conductor de las conexiones eléctricas se hace referencia a la clasificación estadounidense de diámetros para cable de cobre AWG (American Wire Gauge) como se muestra en la figura 3.9.

AWG	Diam. mm	Amperaje	AWG	Diam. mm	Amperaje
1	7.35	120	16	1.29	3,7
2	6.54	96	17	1.15	3,2
3	5.86	78	18	1.024	2,5
4	5.19	60	19	0.912	2,0
5	4.62	48	20	0.812	1,6
6	4.11	38	21	0.723	1,2
7	3.67	30	22	0.644	0,92
8	3.26	24	23	0.573	0,73
9	2.91	19	24	0.511	0,58
10	2.59	15	25	0.455	0,46
11	2.30	12	26	0.405	0,37
12	2.05	9,5	27	0.361	0,29
13	1.83	7,5	28	0.321	0,23
14	1.63	6,0	29	0.286	0,18
15	1.45	4,8	30	0.255	0,15

**Figura 3.9: Calibre AWG para cable de cobre.**

FUENTE: (Rodriguez, 2002)

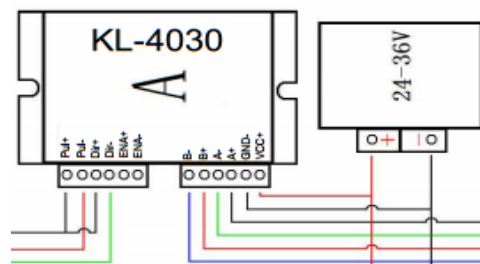
El calibre del conductor que va desde la tarjeta KL-4030 al motor QCI-23K-3 (ver figura 3.10) es de 16AWG debido a que la corriente máxima que circulara por el conductor es de 3.016A, con una longitud de cable de 0.5m.



**Figura 3.10: Conexión de la tarjeta driver al motor a pasos.**

Esta selección se ocupará para la conexión de los cuatro motores QCI-23K-3 restantes.

El calibre del conductor que va desde la fuente cuatro al driver KL-4030 (ver figura 3.11) es de 16AWG debido a que la corriente máxima que circulara por el conductor es de 3A, con una longitud de cable de 2m.



**Figura 3.11: Conexión de la fuente 4 al driver KL-4030.**

Esta selección se ocupara para la conexión del driver KL-4030 restante, y a su vez servirá para el conexionado de la fuente dos con las tres tarjetas Gecko Drivers G202 con una longitud de 0.75m.

La selección del calibre del conductor que alimentara la línea principal del sistema eléctrico depende de la sumatoria de; las corrientes de las cuatro

fuentes de alimentación cuyo valor es de 24.3A, por lo que el calibre del conductor es de 8AWG con una longitud de cable de 2.5m.

### **3.1.3. Parámetros de diseño y selección del software de control.**

Para el sistema de control para el prototipo de fresadora vertical de 5 ejes CNC es obligatorio el uso de un software de control con las siguientes características de compatibilidad y funcionamiento:

Debe ser compatible con las tarjetas electrónicas de control, debe ser compatible con el sistema operativo del ordenador (Windows XP, de 32 bits, procesador como mínimo de 1GHz), tiene que permitir la comunicación de dos puertos paralelos para el control de 5 ejes, tiene que permitir el control de velocidad de la herramienta, debe leer y procesar los códigos G de programación CNC, debe permitir el uso manual y automático de la máquina, tiene que ser de fácil configuración, debe tener seguridades manuales y automáticas como por ejemplo límites de recorrido y paros de emergencia.

Existe distintos tipos de software de control para máquinas CNC de 5 ejes, entre los cuales tenemos: TEBIS V3.4 R4, KCAM, TURBOCNC, MACH, DesKAM, EMC;

Se selecciona el software de control MACH3 gracias a que es un paquete informático que corre sobre una computadora y lo vuelve un controlador de máquina CNC muy poderoso y económico. Sus características de compatibilidad con el ordenador, licencia gratuita (versión estudiantil), fácil configuración, ventaja de cambiar la pantalla del HMI hacen que este software sea óptimo para el sistema de control del prototipo.

### **3.1.4. Parámetros de diseño y selección del HMI.**

La interfaz humana máquina del prototipo, debe cumplir las siguientes características.

Características físicas:

- Una pantalla de escritorio.
- Resolución de pantalla de 1024 x 768 pixeles.

Características de funcionamiento:

- Una pantalla de configuración general.
- Una pantalla para cargar y modificar los códigos G.
- Pantallas para visualización y control del progreso del programa CNC.
- Pantalla para recorrido de los 5 ejes.
- Pantalla para movimiento y posición de la herramienta,
- Pantalla con botonera de configuración.

El HMI de control seleccionado es la pantalla de Mach3 para 6 ejes, puesto que cumple con los parámetros físicos y de funcionamiento para el HMI y además viene con una pantalla de visualización pre establecida, en la cual se aprecia todos los parámetros necesarios de la interfaz, por lo cual de la página oficial del software Mach3 se procederá a descargar la pantalla.

### **Descripción de la pantalla del software Mach3.**

La pantalla que utiliza el sistema de control tiene las siguientes características:

Barra de herramientas para la configuración del sistema de control.

Pantalla para cargar, modificar y correr el programa CNC.

Pantalla para ingreso de datos de forma manual (MDI).

Pantalla para visualizar el recorrido de la herramienta y límites de recorrido.

Pantalla para selección de cero piezas y compensaciones de herramienta.



Pantalla para la configuración del sistema de control.

Pantalla de diagnóstico del sistema de control.

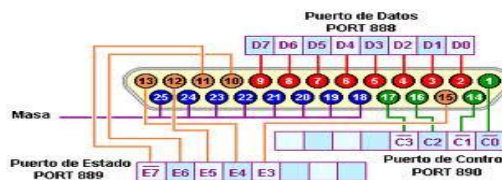
Pantalla para visualización del posicionamiento de la herramienta.

Pantalla de control manual para movimiento de los, activación y velocidad del husillo (JOG).

En cada una de estas pantallas se tiene la posibilidad de visualización de movimiento de los ejes, activación del husillo, y paro de emergencia (ver ANEXO K).

### 3.1.5. Descripción del sistema de comunicación.

Para la comunicación entre el ordenador y el sistema eléctrico-electrónico se debe tener una interfaz de comunicación bidireccional, es decir que permita comunicar datos de entrada y datos de salida. Hay que tomar en cuenta que las tarjetas electrónicas de control seleccionadas tienen la característica física de un conector DB25.



**Figura 3.12: Puertos del conector DB-25.**

La comunicación seleccionada es mediante dos puertos paralelos del ordenador y las características principales son: configuración como comunicación bidireccional, las interrupciones no afecten la comunicación cuando la computadora este enviando y recibiendo información por esté medio.

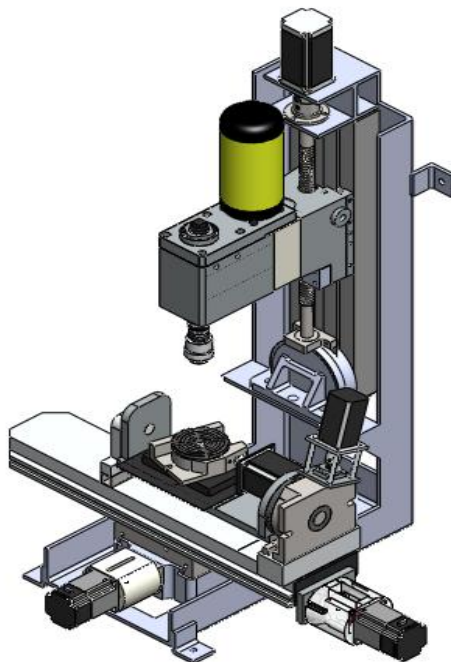
Se utiliza dos cables de comunicación de 3 m de longitud, cada uno con los dos extremos fijados a un macho DB25, permitiendo el transferencia de información entre la PC y las dos tarjetas principales CNC de control que así mismo son compatible con la comunicación LPT.

## CAPÍTULO IV

### IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA

#### 4.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO.

Terminado el diseño y selección del sistema mecánico como se muestra en la figura 4.1, se procede a realizar el ensamblaje de todas sus partes.



**Figura 4.1: Implementación del diseño mecánico.**

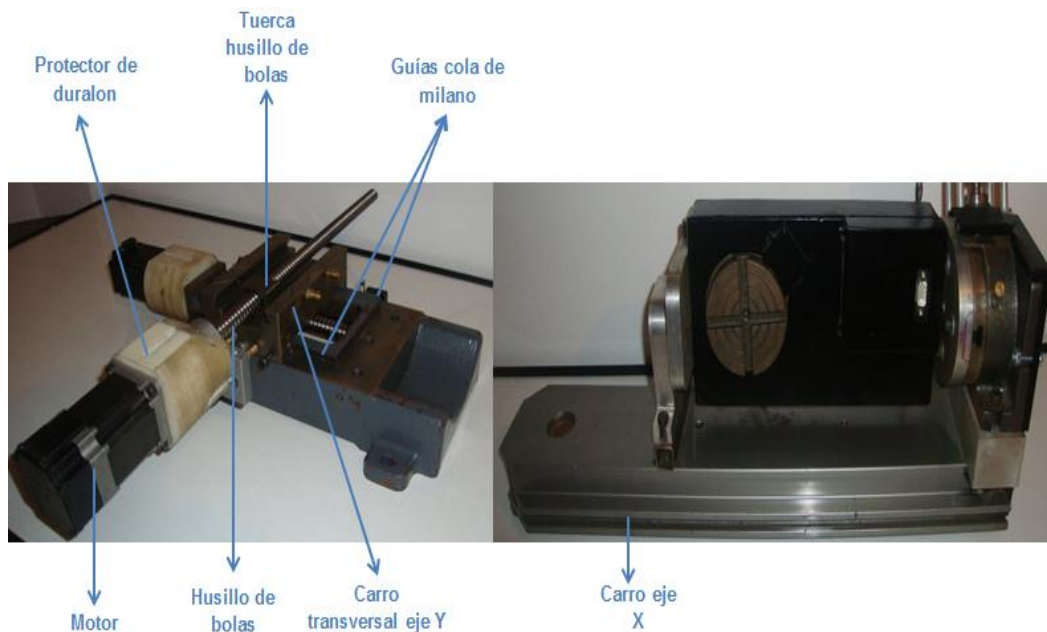
El ensamblaje realizado con CAD se muestra en el ANEXO C, plano MEC001.

##### 4.1.1. Implementación de la estructura de los ejes.

###### a. Implementación de la estructura del eje “X”.

El mecanismo de movimiento del eje “X” consta de su carro transversal con guías cola de milano, el movimiento se realiza con la ayuda del husillo de bolas con su respectiva tuerca acoplado al carro transversal del eje

“Y”, la transmisión del movimiento del motor se da por un acople flexible el cual está cubierto por un protector de duralon como se muestra en la figura 4.2.

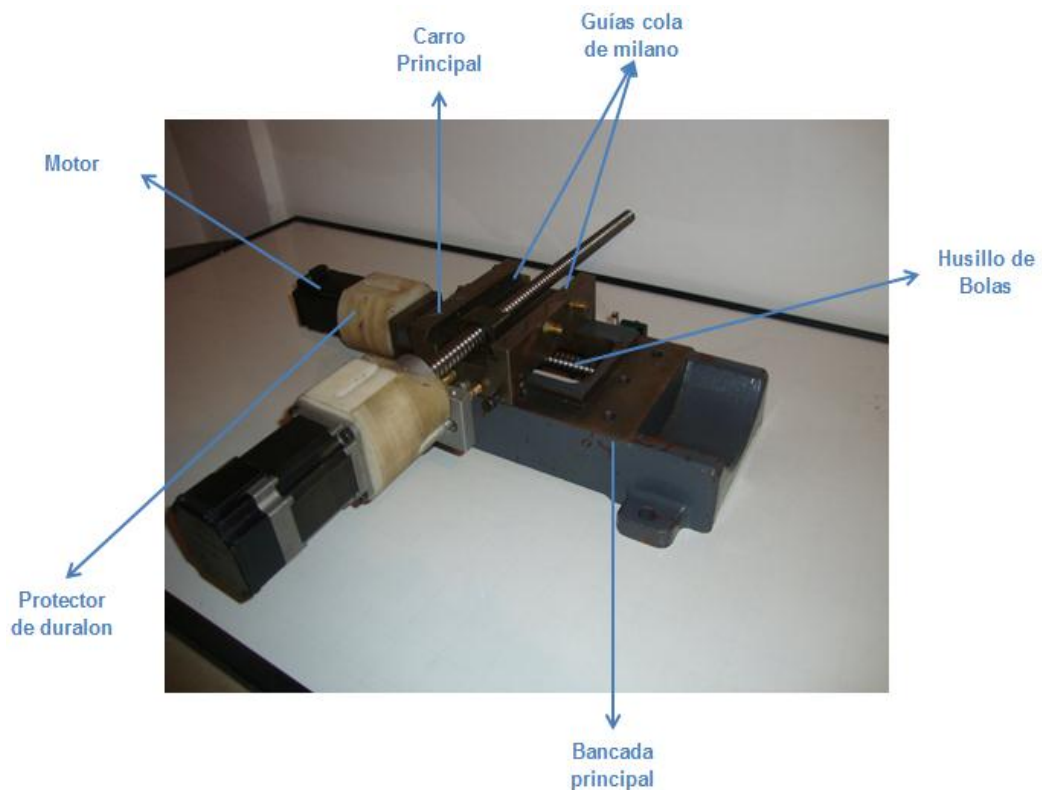


**Figura 4.2: Montaje de la estructura del eje “X”.**

Los planos mecánicos de las piezas y ensambles realizados en CAD de este eje se muestran en el ANEXO C, plano MEC002.

#### **b. Implementación de la estructura del eje “Y”.**

El mecanismo de la estructura del eje “Y” consta de su carro principal con guías cola de milano, este carro se encuentra instalado en la bancada principal; el movimiento de la estructura del eje “Y” está dado por un husillo de bolas con su respectiva tuerca que se encuentra ubicada debajo del carro principal “Y” siendo difícil su visualización e instalación; y la transmisión del movimiento del motor se da por un acople flexible el cual está cubierto por un protector de duralon como se muestra en la figura 4.3.

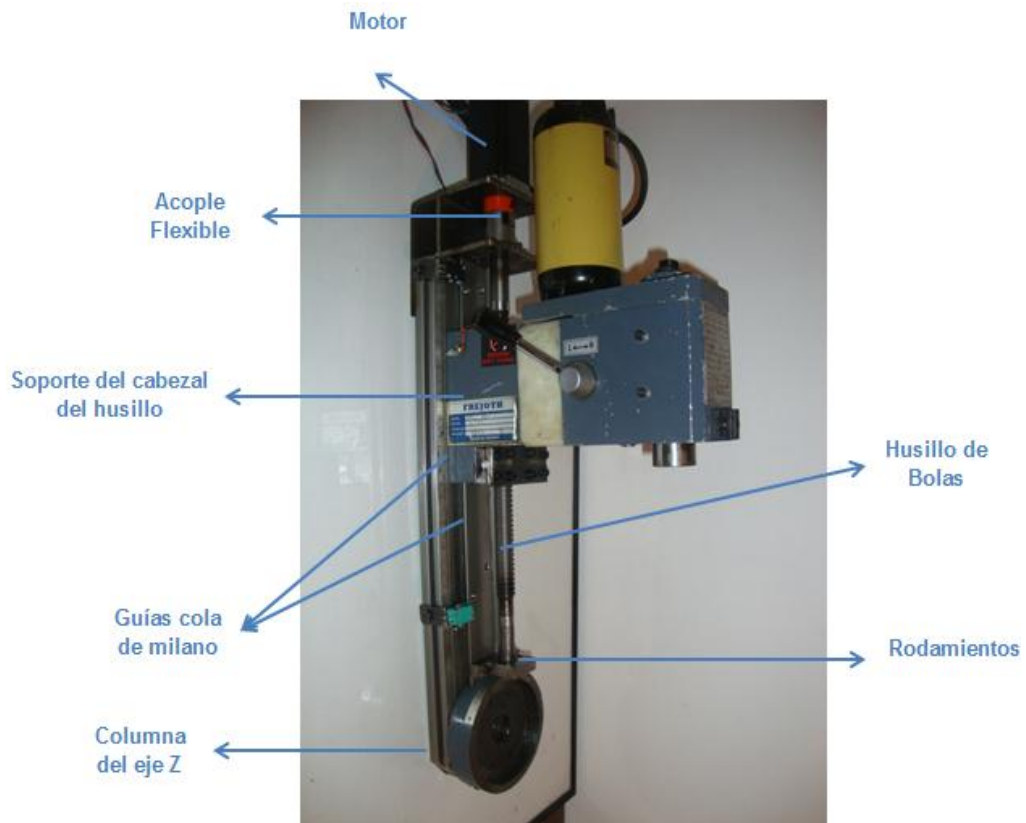


**Figura 4.3: Montaje de la estructura del eje “Y”.**

El ensamble generado mediante el CAD de este eje se aprecia en el ANEXO C, plano MEC003.

**c. Implementación de la estructura del eje “Z”.**

El soporte del cabezal del husillo va ensamblado en el eje “Z” por medio de las guías cola de milano; el movimiento se realiza con el husillo de bolas con su respectiva tuerca acoplada en el cabezal del husillo que no es visible por encontrarse instalada en la parte interior del soporte del cabezal; mientras que el husillo de bolas se encuentra instalado en la columna principal del eje “Z” mediante soportes de rodamientos tanto en su extremo superior como en el extremo inferior, y la transmisión de movimiento del motor se da por un acople flexible como se muestra en la figura 4.4.



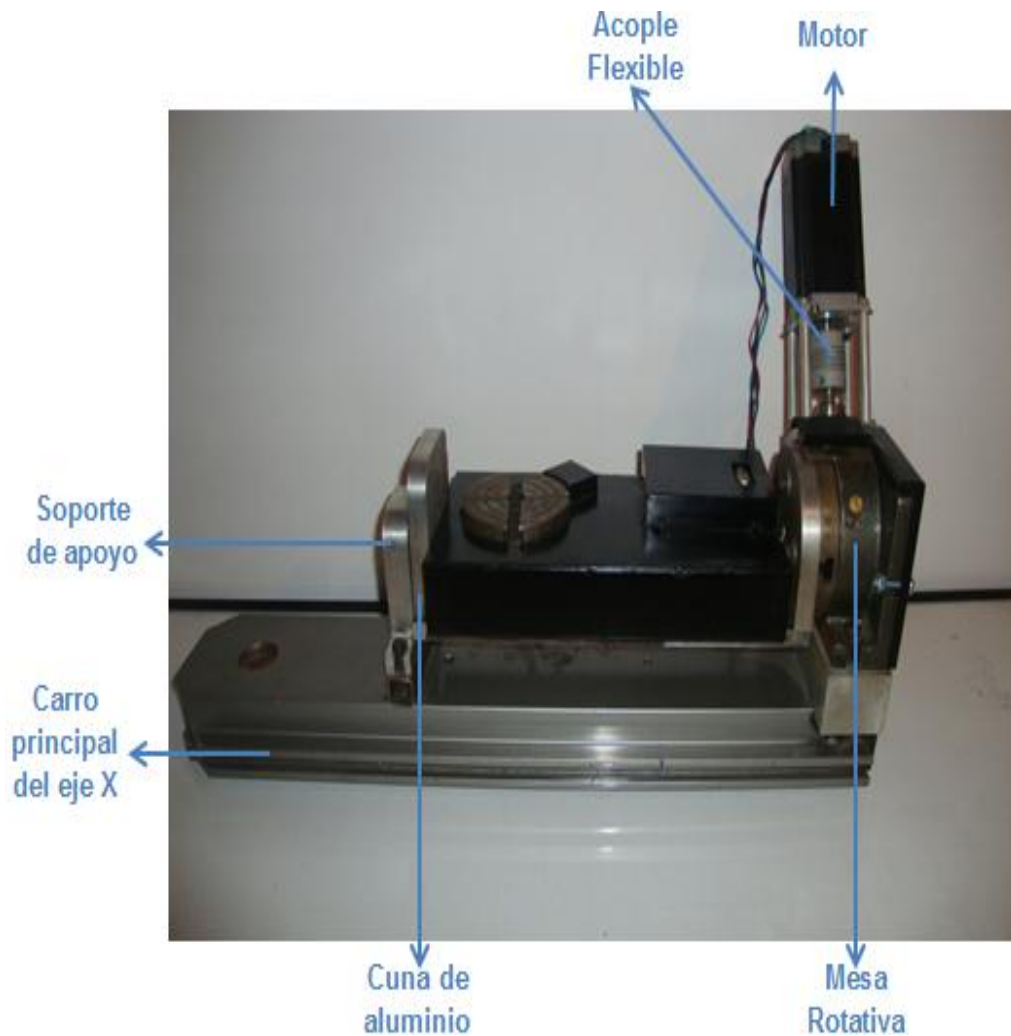
**Figura 4.4: Montaje de la estructura del eje “Z”.**

Los planos mecánicos de las piezas y ensambles realizados en CAD de este eje se muestran en el ANEXO C, del plano MEC004 al MEC008. Mientras que los planos mecánicos de las piezas y ensambles realizados en CAD del cabezal se muestran en el ANEXO C, del plano MEC009 al MEC0013.

**d. Implementación de la estructura del eje “A”.**

La mesa rotativa del eje “A” va montado en la estructura del eje “X” en una base de aluminio sólida que está empotrada en el carro principal del eje “X”, además en la mesa rotativa se encuentra ensamblada una cuna de aluminio con un soporte de apoyo en su otro extremo que sirve como

base para el eje “C”; la transmisión del movimiento del motor se da por un acople flexible, como se muestra en la figura 4.5.



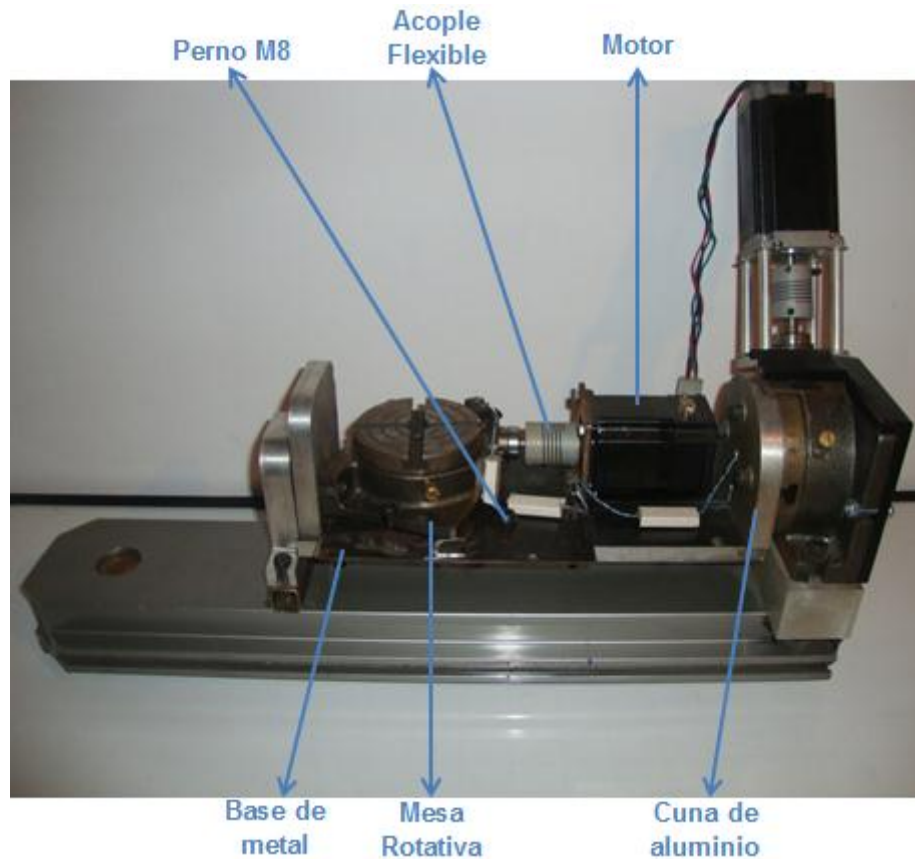
**Figura 4.5: Montaje de la estructura del eje “A”.**

Los planos mecánicos de las piezas y ensambles realizados en CAD de este eje se muestran en el ANEXO C, planos del MEC014 al MEC022.

#### **e. Implementación de la estructura del eje “C”.**

La mesa rotativa del eje “C” se encuentra montada en una base de metal en conjunto con su sistema de transmisión en la cuna de aluminio de la estructura del eje “A” sujeta con tres pernos M8; la transmisión del

movimiento del motor se da por un acople flexible como se muestra en la figura 4.6.



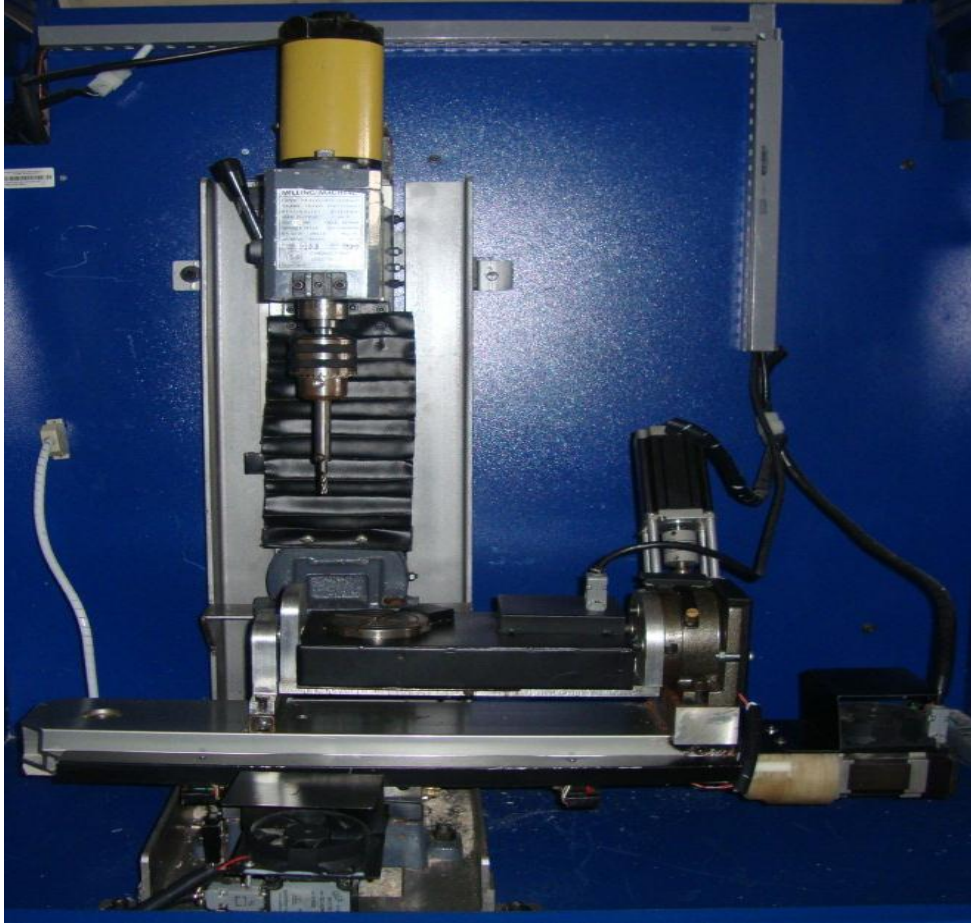
**Figura 4.6: Montaje de la estructura del eje “C”.**

Los planos mecánicos de las piezas y ensambles realizados en CAD de este eje se muestran en el ANEXO C, plano MEC023.

#### **4.1.2. Implementación del sistema mecánico de movimiento a la estructura principal.**

Todo el sistema mecánico que contiene los ejes X, Y, A y C están acoplados a la bancada principal; mientras que el eje “Z” se encuentra ensamblado en la columna de este eje; estos dos mecanismos en conjunto están empotrados en una estructura de metal con seis pernos y tuercas M8, se implementa una carcasa de tol al prototipo como

protección con 6 pernos y tuercas M8, en la figura 4.7 se aprecia toda la implementación mecánica.



**Figura 4.7: Implementación del sistema mecánico.**

Los planos mecánicos de la base principal de acero estructural a la cual se fija los ejes principales se muestran en el ANEXO C, plano MEC024.

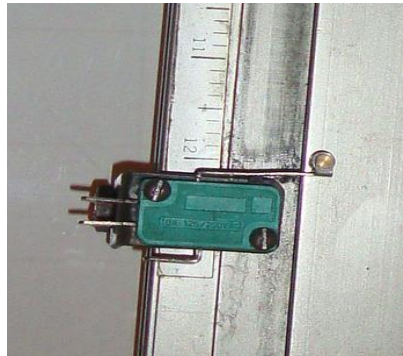
## **4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL LOS SISTEMAS DE CONTROL.**

### **4.2.1. Finales de carrera.**

Los límites de recorrido en las coordenadas X, Y, Z, A, C están controlados mediante software y switches limitadores de carrera (figura 4.8), los cuales usan los contactos normalmente cerrados, los mismos que



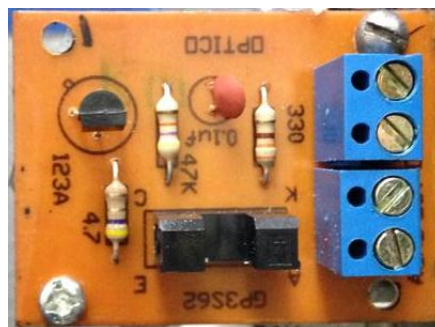
envían una señal en bajo a las tarjetas principales para que detengan el programa, una vez que las plataformas salen de los límites de trabajo.



**Figura 4.8: Switch limitador de carrera.**

#### **4.2.2. Placas del HOME con sensores tipo herradura.**

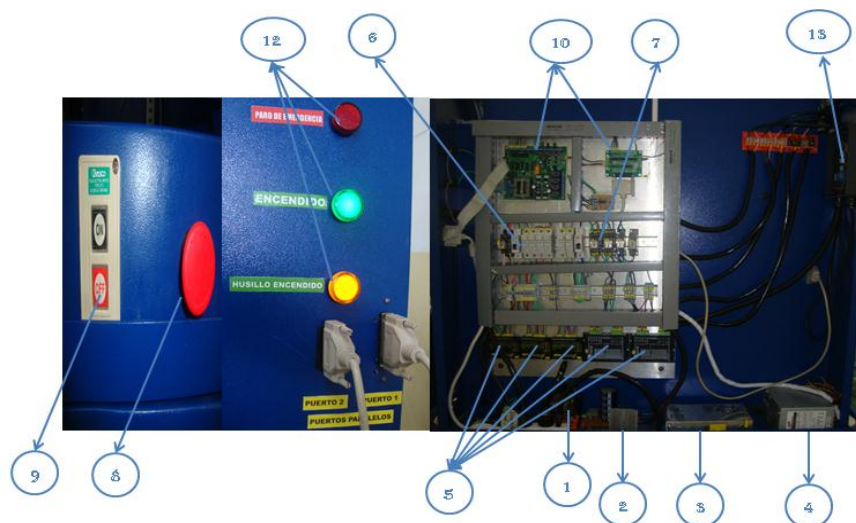
El punto de referencia conocido como Home de la máquina es de vital importancia para la posición inicial de la herramienta, por lo tanto utilizaremos sensores tipo herradura para ubicar la punta de la herramienta en el punto de coordenadas cero de donde iniciara su trabajo, una vez que los sensores (ver figura 4.9) detectan la posición de la plataforma en las coordenadas cero de los ejes X, Y, Z, A, C se detiene el movimiento de los actuadores y permite encerrar la posición de la herramienta en el punto de referencia o Home de la máquina.



**Figura 4.9: Sensores tipo herradura.**

#### 4.2.3. Caja principal de control para el sistema automático de la fresadora vertical de 5 ejes CNC.

En la caja principal en la parte inferior (figura 4.10) se implementan los siguientes elementos: Transformador (1), fuentes de alimentación de 40VDC-12A (2) 36VDC-12A (3) y de 5VDC (4), cinco tarjetas controladoras para los motores (5), fusibles (6), relés de 110 VAC (7), pulsador de paro de emergencia (8), Selector ON/OFF para el encendido de la máquina (9), en la parte superior tenemos los siguientes elementos: tarjetas principales (10), dos adaptadores DB25 hembra para la interface de la PC con las tarjetas principales (11), luces pilotos (12), tarjeta de variación de velocidad del mandril (13).



**Figura 4.10: Caja de control, parte interna y externa.**

El diagrama electrónico – eléctrico para el control del movimiento de los 5 ejes y el control de velocidad del husillo se muestra en el ANEXO D, plano MEC025.

#### **Características de conexión de la tarjeta Gecko Driver G202.**

Los terminales que se conectarán a las bobinas del motor a pasos son: A+ A- y B+ B-, y su conexión es bipolar.

La identificación de los terminales de la tarjeta controladora G202 se observa en la tabla 4.1.

**Tabla. 4.1: Terminales de la tarjeta geckodriver 202.**

Terminal	Descripción
1	Tierra o GND de la fuente de alimentación de VDC.
2	Voltaje de alimentación en un rango de 24 a 80 VDC
3	Al inicio de un bobinado del motor (bobina A).
4	Al final del bobinado del motor (bobina B).
5	Al inicio del otro bobinado (bobina C).
6	Al final del otro bobinado (bobina D).
7	No se usa este terminal.
8	Al terminal de dirección DIR desde la tarjeta principal.
9	Al terminal de paso STEP desde la tarjeta principal.
10	Se conecta a +5 VDC del paso / dirección.
11	Se conecta al inicio de la resistencia R.
12	Se conecta al final de la resistencia R.

La resistencia (R) que se coloca entre los terminales (11) y (12), se calcula con la Ecuación 4.1 en función de la corriente que consume el motor.

$$R = \left( \frac{47 * I}{7 - I} \right) K\Omega \quad \text{Ec. 4.1}$$

### **Características de conexión tarjeta Microstepping Driver KL 4030**

La identificación de los terminales de la tarjeta controladora KL 4030 se describe a continuación:

Pines del conector P1:

PUL+ (+ 5V) → Señal de pulso

PUL- (PUL) → Señal de pulso

DIR + (+ 5V) → Señal de DIR

DIR - (DIR) → Señal de DIR

ENA + (+ 5V) → Señal de habilitación

ENA – (ENA) → Señal de habilitación

Pines del conector P2:

GND → Tierra o GND de la fuente de alimentación de VDC

+V → Voltaje de alimentación en un rango de 20-40VDC

A+, A- → Motor Fase A

B+, B- → Motor Fase B

Los dos últimos terminales se conectarán a las bobinas del motor a pasos en conexión bipolar.

El ajuste de la corriente de trabajo estará a cargo de los DIP Switch como se muestra en la tabla 4.2

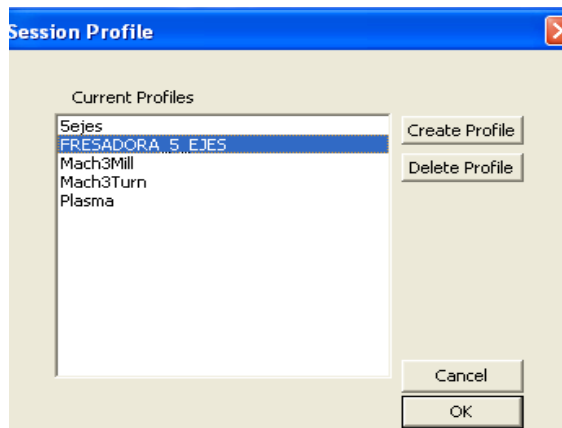
**Tabla 4.2. Ajuste de corriente.**

<b>Corriente Amperios</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>
0.9	0	0	0
1.2	0	0	1
1.5	0	1	0
1.8	0	1	1
2.1	1	0	0
2.4	1	0	1
2.7	1	1	0
3.0	1	1	1

Más características técnicas eléctricas y mecánicas de esta tarjeta se muestran en el ANEXO H.

#### **4.2.4. Configuración del Mach3.**

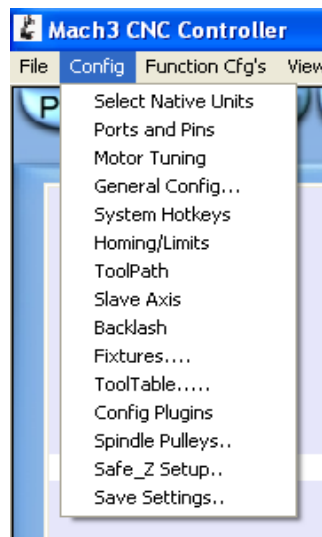
Antes de abrir el Mach3 descargamos la pantalla principal de una máquina fresadora de hasta seis ejes y pegamos este documento en la carpeta principal del programa con el nombre de fresadora vertical de cinco ejes; al momento de ejecutar el icono de Mach3 se observa el perfil llamado fresadora vertical de cinco ejes como se muestra en la figura 4.11.



**Figura 4.11: Perfil de la fresadora de 5 ejes**

La configuración del perfil se muestra a continuación:

En la barra de menú se encuentra la opción de configuración, donde se ingresan los parámetros adecuados para que el software y hardware funcionen correctamente, en esta opción se muestran 20 puntos que deben ser configurados, como por ejemplo el sistema de mediada (unidades), motores, encoders y demás elementos (figura 4.12).



**Figura 4.12: Opciones de configuración.**

#### a. Configuración de unidades nativas.

Las unidades de trabajo de Mach3 se configuran en la barra de menú Config > SelectNativeUnits, aquí se selecciona el sistema de unidades en el cual se desea trabajar; puede ser el sistema métrico o el sistema inglés (figura 4.13).



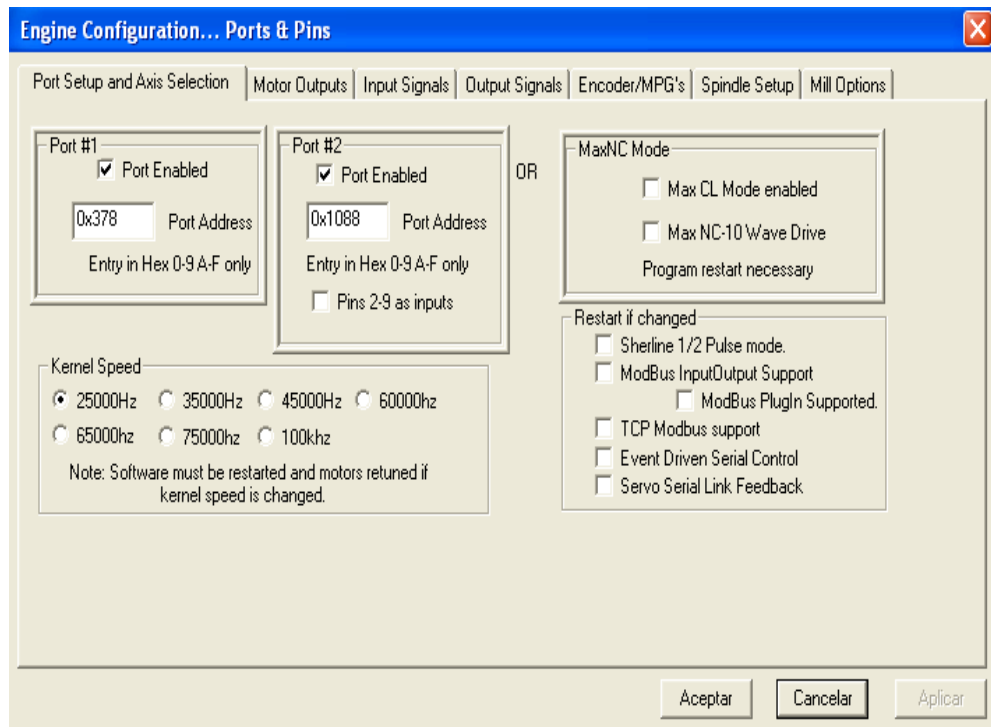
**Figura 4.13: Selección del sistema de unidades.**

Esto depende en que unidades se va a trabajar e influirá en la creación de los códigos G; G20 es para el sistema Inglés y G21 para el sistema Métrico; se selecciona la opción MM`s (milímetros) y se confirma al dar un clic en la opción OK.

#### b. Configuración de puertos y pines.

La configuración de puertos y pines se realiza al ingresar en el menú Config > Ports and Pins, en el cual se encuentra un cuadro principal que contiene las siguientes pestañas.

En el Port And Axis Selection (Configuración del Puerto y selección de los Ejes) como se indica en la figura 4.14; se configuran los puertos a utilizar, el primero que por defecto está activado Port#1, con la dirección 0x378, y el segundo Port#2, con la dirección 0x1088.



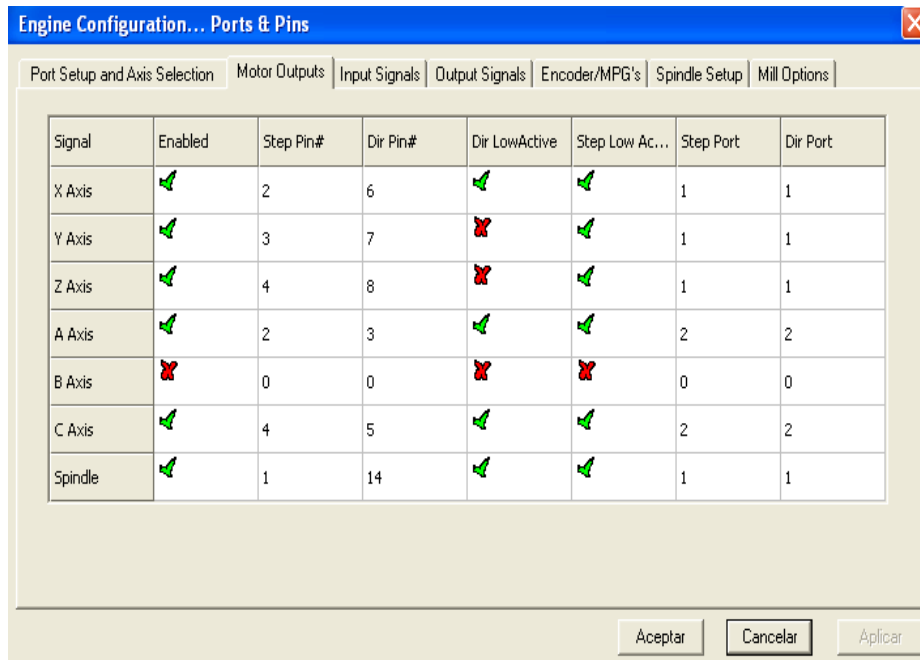
**Figura 4.14: Configuración de puertos y ejes.**

Si se usan los dos puertos se debe colocar la dirección en hexadecimal.

Además se especifica la frecuencia de trabajo; Mach3 trabaja con frecuencias de 25,000 Hz (Pulsos por segundo), 35,000 Hz, 60,000Hz, 65,000Hz, 75,000Hz y 100,000, esto dependerá de la velocidad del procesador que se utilice; se trabaja con una frecuencia de 25,000Hz cuando se tiene un procesador inferior a 1GHz; con 35,000Hz para un procesador inferior a 2GHz; con 45,000Hz para un procesador inferior a 3GHz; con 60,000 para un procesador inferior a 4GHz; debido a que el procesador de la PC seleccionada para la fresadora vertical de 5 ejes CNC es de 3.4GHz, se escoge una velocidad de 60,000Hz.

En Motor Outputs (salidas de Motores) como se indica en la Figura 4.15; se habilita el número de ejes a manejar (Enabled); se seleccionan los pines del puerto paralelo para direccionar las señales de paso (Step Pin#) y dirección (Dir Pin#); se selecciona el estado de dichas señales

(DirLowActive & StepLowActive) y el número del puerto por el cual son enviados (Step Port & Dir Port).

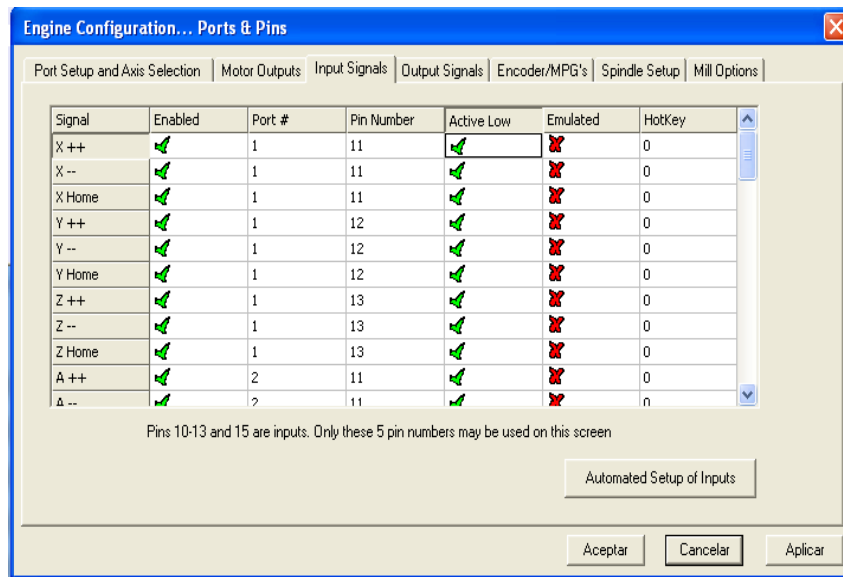


**Figura 4.15: Configuración de salidas a los ejes en el Mach3.**

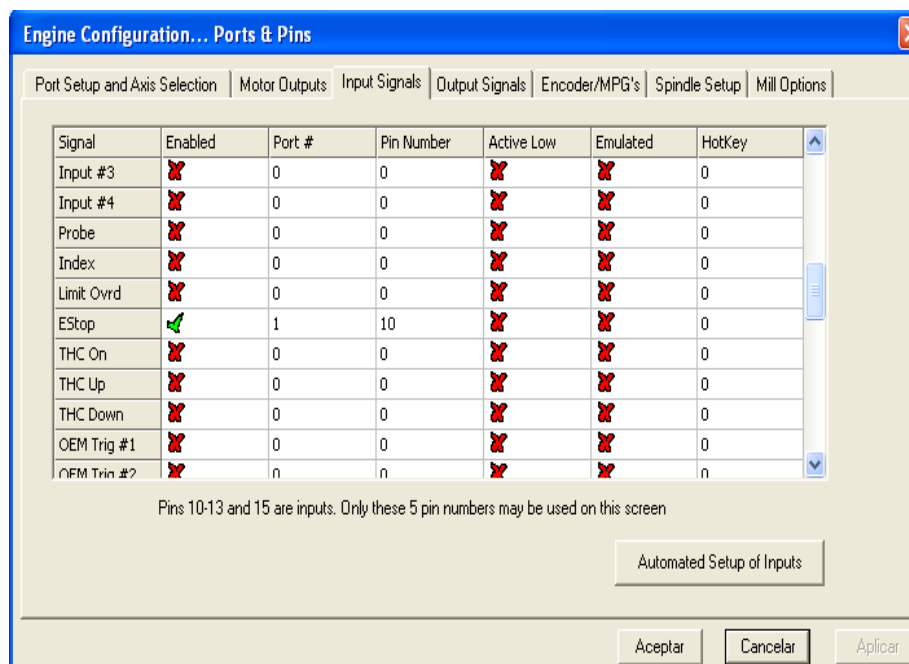
En el caso de corregir las direcciones de los movimientos de los ejes X, Y, Z, A, C; se puede interactuar con los estados altos y bajos de la opción DirLowActive.

En Input Signals (Señales de Entrada) como se indican en las figuras 4.16 y 4.17; se detallan las configuraciones por los pines por los cuales se receptaran las señales de los Limit Switch (X++, x--, Y++, Y--, Z++, Z--), Home Switch y el paro de emergencia (EStop), esto en la primera tarjeta mientras que para la segunda se detallara las configuraciones de los pines del segundo puerto paralelo por los cuales se receptaran las señales de los limit switch (A y C), estas señales se toman de las Tablas 3.2 y 3.3 de la sección 3.1.2.



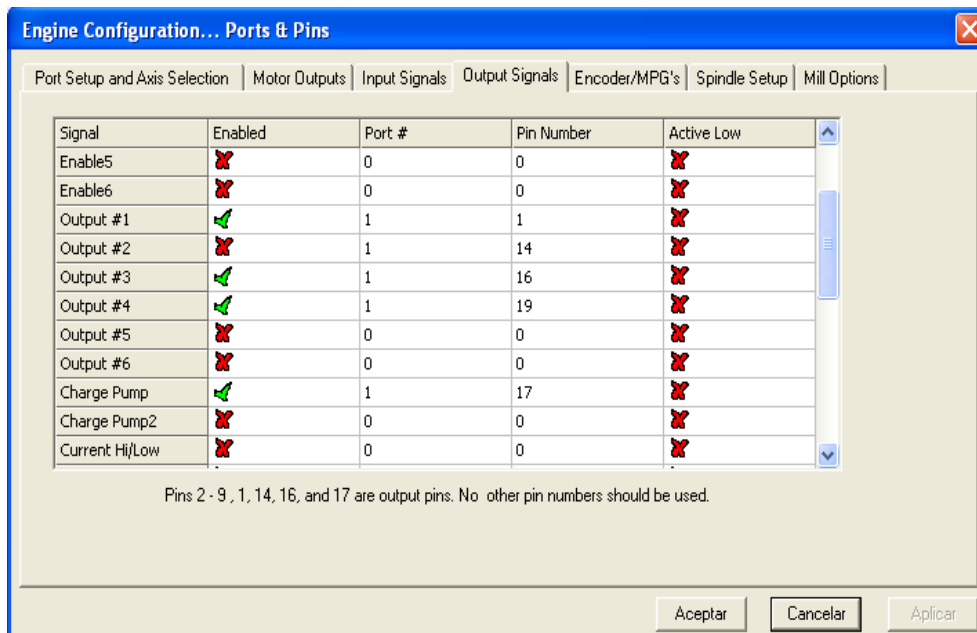


**Figura 4.16: Configuración de los switch en el Mach3.**



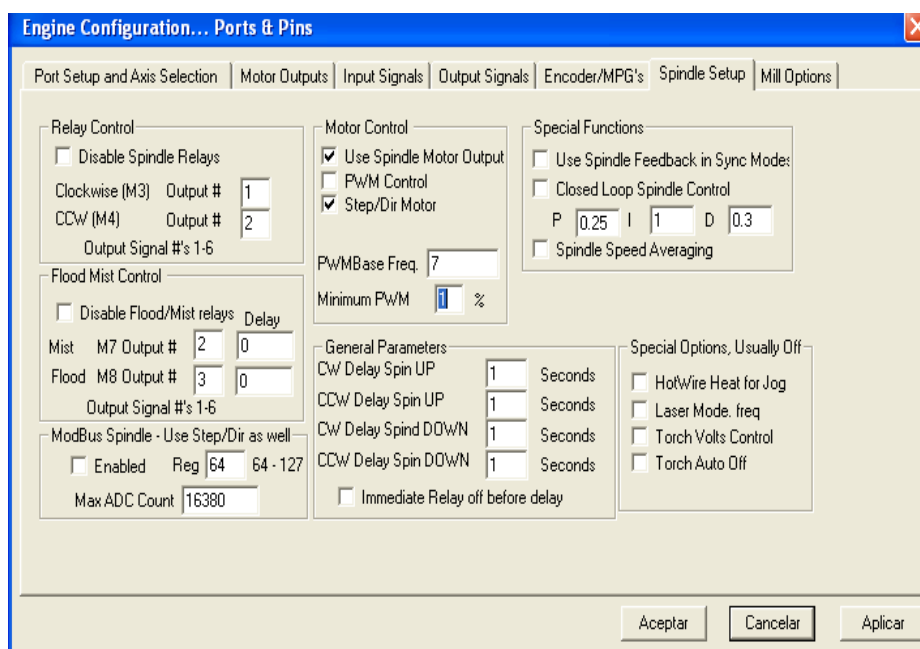
**Figura 4.17: Configuración del paro de emergencia en el Mach3.**

En Outputs Signals (Señales de Salida) como se indica en la figura 4.18; en esta se configuran la salidas a relé; esta configuración se toma de la Tabla 3.2 de la sección 3.1.2.



**Figura 4.18: Configuración de las salidas a relé en el Mach3.**

En Spindle Setup (Configuración del Husillo) Como se indica en la figura 4.19; simplemente se habilitan las salidas a los relés.



**Figura 4.19: Configuración de salidas a relés y spindle en el Mach3.**

### **c. Sintonización de motores (Motor Tuning).**

En la sintonización de motores debemos ingresar los parámetros de velocidad, aceleración y el número de pasos por unidad de Mach3 en los diferentes ejes; los datos de velocidad, aceleración y desaceleración se pueden calcular de acuerdo a las masas de las partes, momentos de inercia del motor y tornillos, fuerzas de fricción y de torque disponible; pero el software recomienda colocar los valores realizando pruebas de funcionamiento de arranque y frenado, para obtener un sonido confortable, no es un método científico pero da buenos resultados, los datos de pasos por unidad de Mach3, se calcula en función de, la unidad mecánica, las propiedades del motor a pasos, de la siguiente manera.

Pasos por unidad Mach3 = Pasos por rev. Mach3 \* Rev. Del motor por unidad.

Dónde:

Pasos por rev: Mach3 = Pasos por rev. del motor.

Pasos por rev. del motor difieren del tipo de motor a emplearse, un motor a pasos usualmente da 200 pasos completos por revolución, gracias a la tarjeta se tiene 10 micro pasos por pasos completos, entonces se tiene 2000 pasos por revolución.

Para tornillos en milímetros.

Rev. del motor por unidad = (rev. tornillo por unidad \* Ns)/N.m.

La relación de este dato debe ser 1 o inferior a 1 cuando se trata de milímetros y cuando se trata de pulgadas debe ser superior a 1.

Dónde:

Rev. tornillo por unidad = 1/ paso efectivo del tornillo.

$N_s$  = Número de dientes del engranaje que se encuentra acoplado al tornillo.

$N.m$  = Número de dientes del engranaje que se encuentra acoplado al eje del motor.

Paso efectivo del tornillo = La distancia que mueve el eje por una rev. tornillo.

Cuando se tiene un tornillo con múltiples entradas, se debe multiplicar el paso efectivo por el número de entradas.

Para tornillos en pulgadas son las mismas ecuaciones, la diferencia radica que se emplea los hilos por pulgada (hpp), esto ingresa en el paso efectivo del tornillo de la siguiente manera:

Paso efectivo del tornillo =  $1/hpp$

De igual manera si se tiene múltiples entradas en el tornillo, se debe multiplicar el número de entradas por el paso efectivo.

Para ejes rotativos (mesas rotativas) la unidad es el grado. Es necesario hacer cálculos basados en la relación del tornillo. Esta tiene a menudo 90:1. Así con un accionamiento por motor directo al tornillo una revolución da 4 grados así las revoluciones del motor por unidad es 0.25. Una reducción de 2:1 de motor a tornillo da 0.5 revoluciones por unidad.

### **Sintonización para los ejes X, Y, Z:**

Datos:

Paso efectivo del tornillo: 5mm

Los datos  $N_s$  y  $N.m$  no se da porque es un acoplamiento directo.

Rev. Tornillo por unidad=  $1/\text{paso efectivo del tornillo}$ .

Rev. Tornillo por unidad=  $1/5 = 0.2$

Rev. Del motor por unidad=  $(\text{revs del tornillo por unidad} \times N_s)/N.m$

Rev. Del motor por unidad=  $0.2 = 0.2$

Los ejes X, Y, Z se maneja mediante motores a pasos, se selecciona los datos que son para estos actuadores, por lo tanto se tiene:

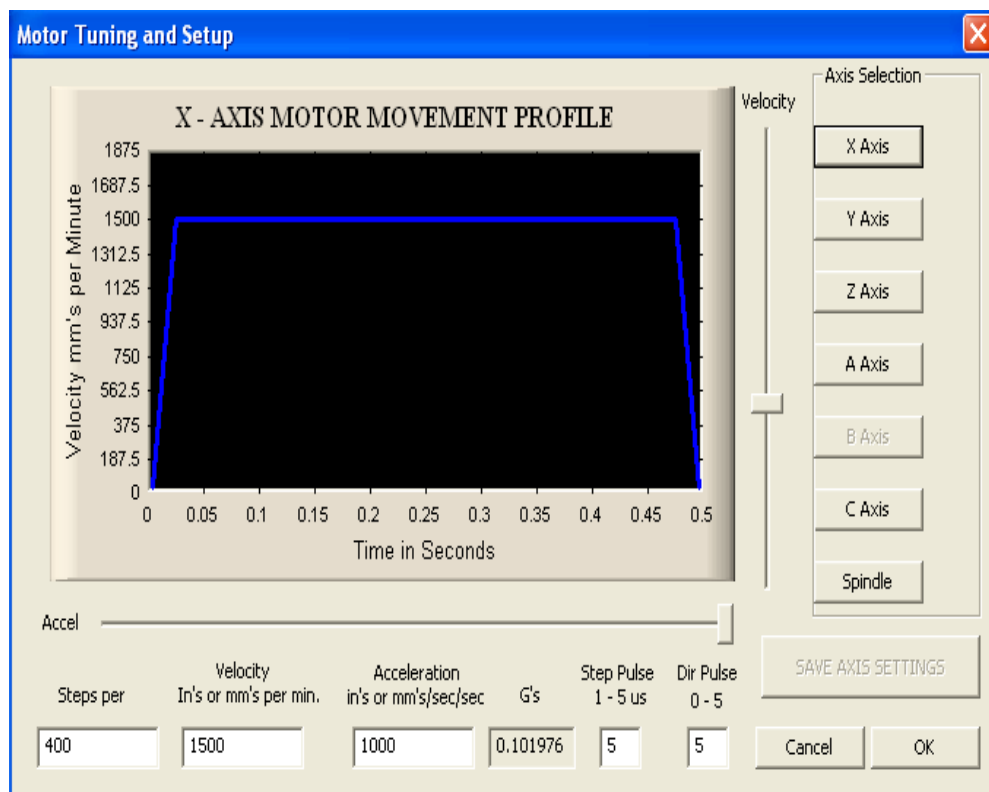
Pasos por rev. Mach3 = Pasos por rev. del motor.

Pasos por rev. Mach3 = 2000 pasos por rev. Mach3

Pasos por unidad Mach3 = Pasos por rev. Mach3 x Revs. del motor por unidad.

Pasos por unidad Mach3 = 2000 x 0.2 = 400 pasos por unidad Mach3

Una vez obtenido estos valores se ingresan en el cuadro de diálogo de Motor Tuning, como se aprecia en la figura 4.20.



**Figura 4.20: Sintonización de los motores para los ejes X, Y, Z.**

Cada vez que se realice un cambio de configuración en cualquier eje, siempre debe pulsar el botón de Save Axis Tuning para guardar los cambios realizados.

## Sintonización para los ejes A, C:

Como estos ejes son mesas rotativas cuya unidad es el grado, se tiene una relación de 36:1 tenemos los siguientes datos.

Datos:

Rev. Del motor por unidad=  $0.1 = 0.1$

Los ejes A, C se manejan mediante motores a pasos, se selecciona los datos que son para estos actuadores, por lo tanto se tiene:

Pasos por rev. Mach3 = Pasos por rev. del motor.

Pasos por rev. Mach3 = 2000 pasos por rev. Mach3

Pasos por unidad Mach3 = Pasos por rev. Mach3 x Revs. del motor por unidad.

Pasos por unidad Mach3 =  $2000 \times 0.1 = 200$  pasos por unidad Mach3

Una vez obtenido estos valores se ingresan en el cuadro de diálogo de Motor Tuning, como se aprecia en la Figura 4.21.

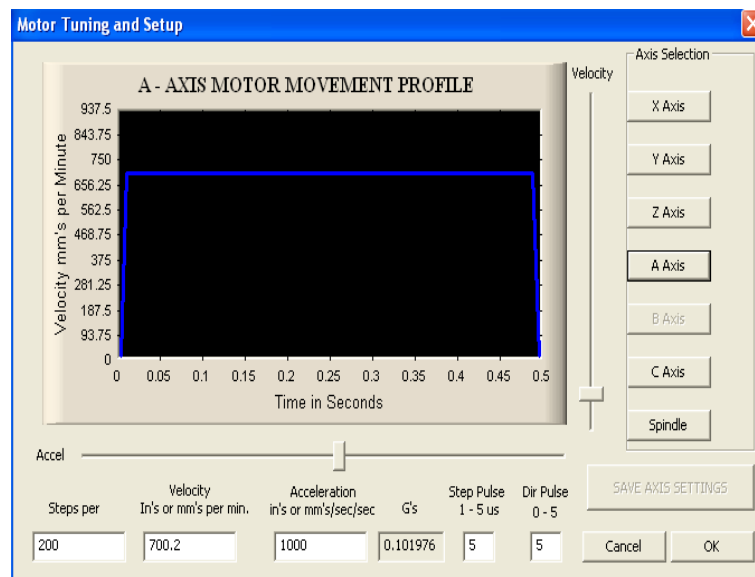


Figura 4.21: Sintonización de los motores para los ejes A, C.

## Sintonización Para el Husillo.

Datos:

$N_s = 25$  dientes

$N.m = 17$  dientes

Incremento por unidad= 1000 pasos por revolución

Para encontrar la máxima velocidad debemos tomar en cuenta la relación de la transmisión por banda.

Max. Velocidad del motor= 4000 rpm

Max. Velocidad del mandril=  $(N.m/N_s) \cdot \text{Velocidad del motor}$

Max. Velocidad del mandril=  $(17/25) \cdot (4000 \text{ rpm})$

Max. Velocidad del mandril= 2720 rpm

En la ventana de “Motor Tuning”; en la opción Spindle, se ingresan estos valores. Como se observa en la figura 4.22.

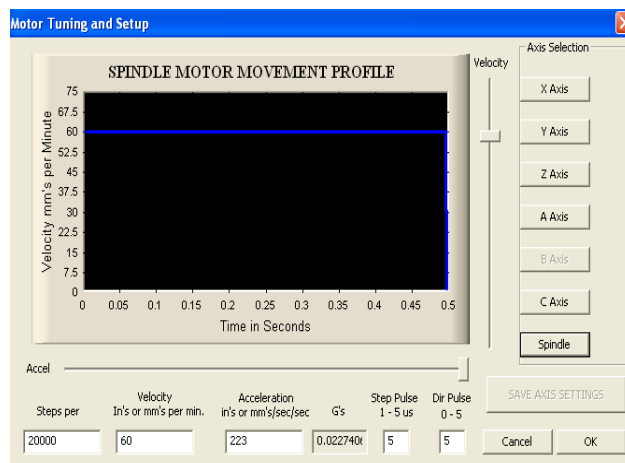


Figura 4.22: Sintonización del motor para el mandril.

### d. Configuración de los límites por software (SoftLimits)

Para la configuración de los límites por software se debe ingresar al cuadro de dialogo de configuración de Home/Soft Limits como se observa

en la figura 4.23, donde permite definir los límites de funcionamiento de la fresadora vertical de 5 ejes CNC.

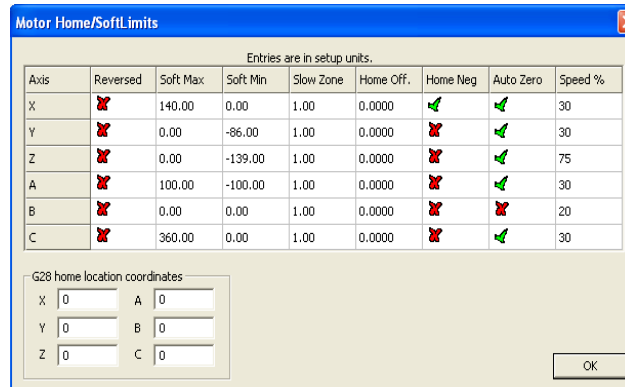


Figura 4.23: Configuración de la referencia de operación.

#### 4.2.5. Controles del programa Mach3.

A continuación se detallan los controles de mando y visualización que posee la pantalla principal del programa Mach3 para el control de la máquina fresadora vertical de 5 ejes como se observa en la figura 4.24.

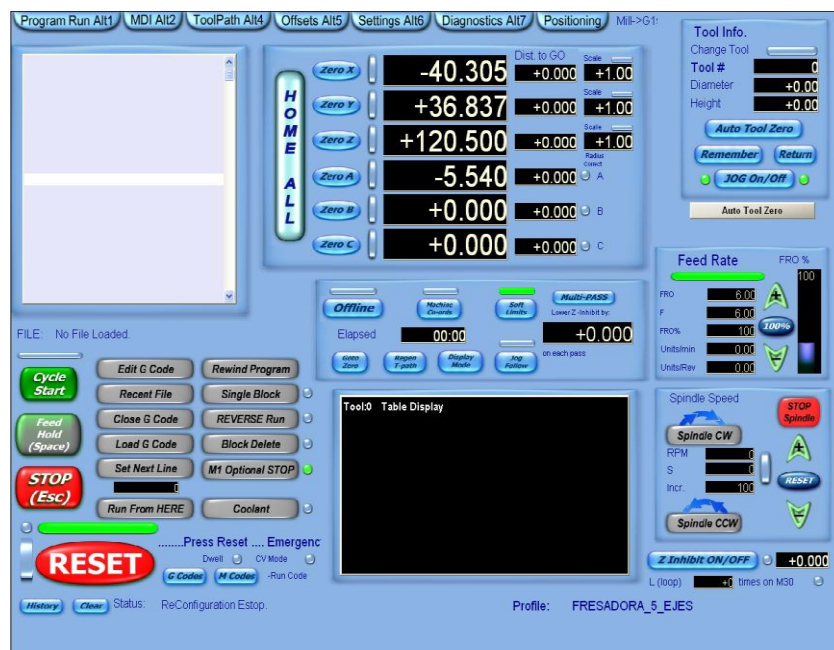
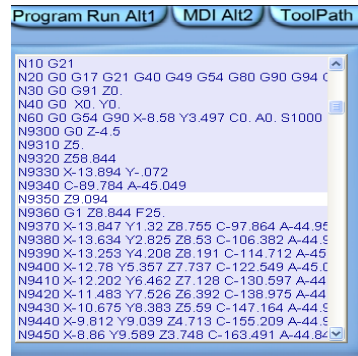


Figura 4.24: Controles de la pantalla principal.



En la pantalla de visualización de los códigos G; se observa la líneas de programación generadas con anterioridad con ayuda del software MasterCamX6 (figura 4.25).



**Figura 4.25: Pantalla de visualización de los códigos G.**

En la pantalla de posición de la herramienta, se observa la posición o distancia que se desplaza cada eje al momento de ejecutar un código G, además se puede hacer cero todos los ejes al momento de llegar al punto de referencia o Home (figura 4.26).



**Figura 4.26: Pantalla de posición de la herramienta.**

La figura 4.24 muestra la pantalla principal con algunos controles que se detallan a continuación:

**Cycle:** Este botón sirve para ejecutar el programa.

**Stop:** Con este se detiene el control de los ejes rápidamente.

**Rewind:** Nos permite rebobinar el actual programa.

**Zero X:** Coloca a cero solo el eje “X”.

**Zero Y:** Coloca a cero solo el eje “Y”.

**Zero Z:** Coloca a cero solo el eje “Z”.

**Zero A:** Coloca a cero solo el eje “A”.

**Zero C:** Coloca a cero solo el eje “C”.

**Reset:** Permite apagar o parar al programa.

**Load:** Aquí el operario puede cargar un programa desde una dirección específica.

**Recent:** Abre todos los archivos usados recientemente.

**Unload:** Limpia la pantalla de códigos G del programa que este cargando en ese momento.

Se tiene la opción **MDI Line** (entrada de datos manualmente), donde se puede ingresar los códigos y ser ejecutados manualmente mediante el teclado, esta función se emplea cuando existe alguna anomalía en el programa o parada de emergencia, entonces se ingresa el código a fin de retornar al punto de origen; también se emplea para realizar pruebas (figura 4.27).



**Figura 4.27: Formas de ingresar códigos G.**

#### **4.2.6. Ingresar un programa de códigos G en Mach3.**

Para ingresar un programa de códigos G en nuestro software, se realiza dando un click en el icono de la pantalla principal Load G Code y se selecciona el archivo que se va a ejecutar, como se observa en la Figura 2.28.

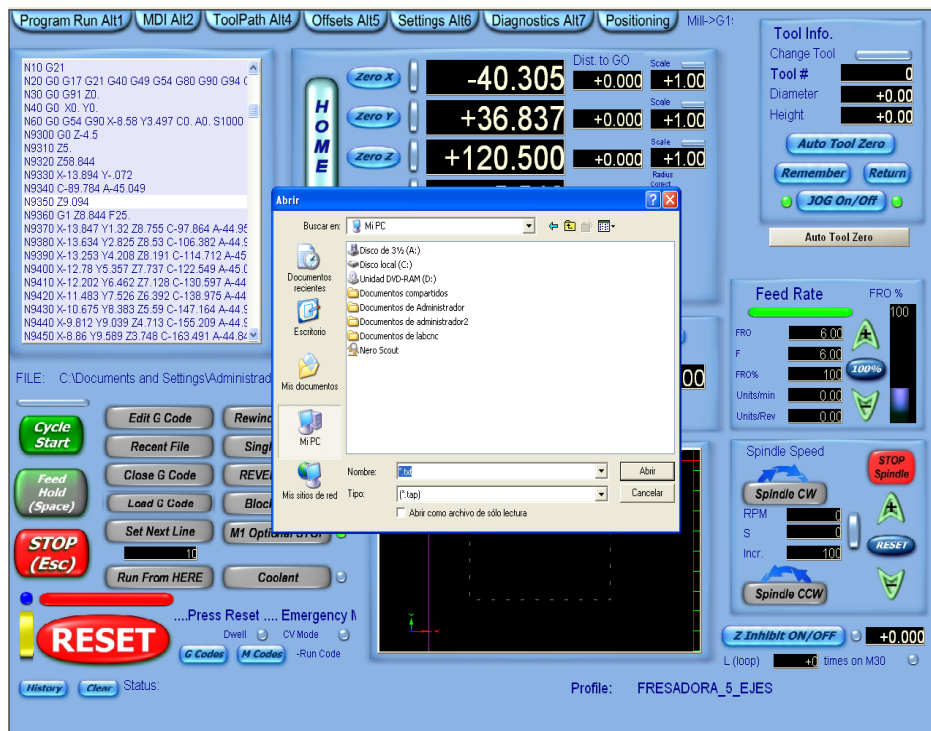


Figura 4.28: Formas de ingresar un programa de códigos G.

#### 4.2.7. Interfaz de comunicación hacia el sistema de control.

Es necesario especificar la interfaz de comunicación que se maneja entre la PC y las tarjetas principales. La comunicación entre la PC y las tarjetas principales es paralela, por aquí se envían los datos hacia los actuadores y se recibe las señales de los Limit y Home Switches.

Se utiliza la comunicación paralela porque el software Mach3 emplea esta interfaz y además porque es muy fácil enviar señales TTL de 0 o 5 Voltios “0L” o “1L”.

Se realiza por medio de dos cables, que tiene una longitud de 305mm (12in.), con dos conectores DB25 machos en sus extremos, que se conectan entre el puerto de la impresora de la PC y la primera tarjeta principal (mientras que para la segunda tarjeta principal se instaló otro puerto paralelo en la PC), a través de un adaptador en el cual uno de sus extremos tiene un conector DB25 hembra, que se conecta al cable de la

interfaz y el otro tiene un conector DB26 que se conecta a la primera tarjeta principal. La distribución de pines de los adaptadores se presenta en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3: Distribución de pines del adaptador.**

Pin1	Salida 1
Pin2	Pasos para el eje "X"
Pin3	Pasos para el eje "Y"
Pin4	Pasos para el eje "Z"
Pin5	Pasos para el eje "A"
Pin6	Dirección para el eje "X"
Pin7	Dirección para el eje "Y"
Pin8	Dirección para el eje "Z"
Pin9	Dirección para el eje "A"
Pin10	Parada o Estop.
Pin11	Home X
Pin12	Home Y
Pin13	Home Z
Pin14	Salida 2
Pin15	Home A
Pin16	Salida 3
Pin17	Salida 4 pin para cargar bomba
Pin18 a 26	PC GND.

#### **4.3 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA MECÁNICO Y DE CONTROL.**

Finalizando la implementación del sistema mecánico y del sistema de control queda efectuar las pruebas de funcionamiento en las coordenadas X, Y, Z, A, C; así como la calibración de los carros y el movimiento de los mismos a través de los motores, observando que los mecanismos de transmisión no tengan atascamientos ni ruidos extraños. Estas pruebas de funcionamiento se las realizará con la ayuda del software Mach3, realizando el desplazamiento de cada uno de los ejes uno por uno, hasta comprobar su correcto funcionamiento.

#### **4.3.1. Calibración de las tarjetas de control de los motores.**

Determinado la distribución de terminales en los motores y verificadas las conexiones de alimentación, como se muestra en el plano eléctrico (ANEXO D), se calibra las variables de corriente, amortiguación y ganancia, de acuerdo a la hoja de datos de las diferentes tarjetas de control, hasta encontrar las condiciones óptimas de operación.

#### **4.3.2. Desplazamiento de los carros a lo largo de las coordenadas X, Y, Z, A, C.**

Para la verificación del movimiento de los ejes X, Y, Z, A, C; asignamos teclas para cada uno de los ejes, con el fin de facilitar su desplazamiento, y así comprobar que los ejes se mueven de manera correcta en la dirección seleccionada.

#### **4.3.3. Encendido del husillo.**

Una vez que se ha configurado los parámetros necesarios para el encendido del husillo, se verifica la alimentación de la máquina, se procede a realizar el encendido del husillo (Figura 4.29) tomando en cuenta las precauciones necesarias para el arranque del mismo.



**Figura 4.29: Encendido del husillo.**

#### 4.4 Enlace CAD/CAM.

Para el diseño asistido por computadora (CAD) se utiliza el software SolidWorks tanto para piezas simples como complejas; como se observa en la figura 4.30.

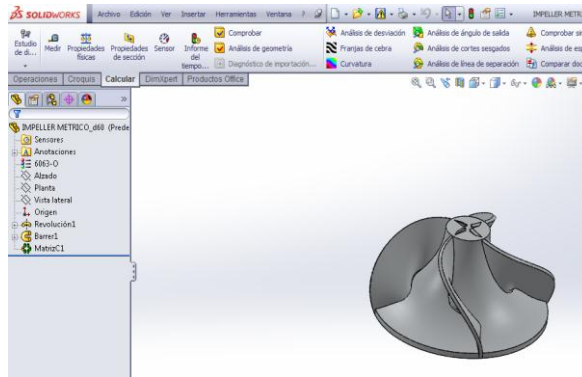


Figura 4.30: CAD en SolidWorks.

Una vez obtenido el sólido se procede a exportar a MasterCam el cual es un software muy útil para realizar CAM (manufactura asistida por computadora); permite mecanizar tanto en tres como en cinco ejes para una fresadora vertical, configurando previamente las velocidades de avance y del husillo, además se puede simular el mecanizado (figura 4.31).

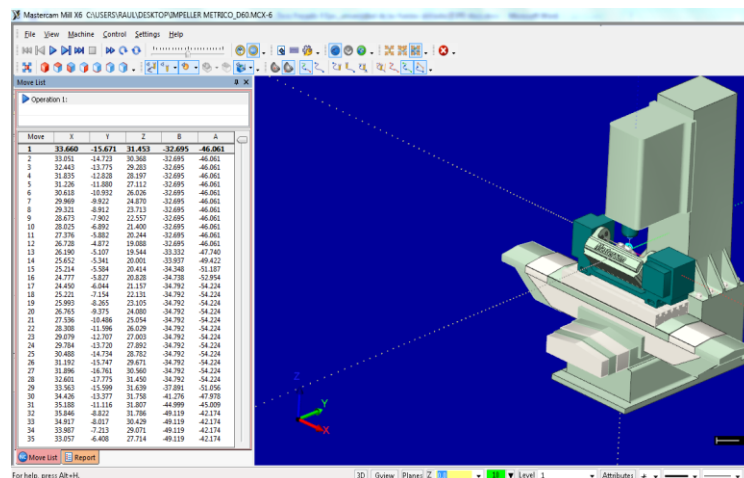


Figura 4.31: CAM en MasterCamX6.

Y por último MasterCamX6 permite generar los códigos G como se observa en la figura 4.32.

```

:0001 (IMPELLER METRICO_D60)
 (DATE=DD-MM-YY - 19-12-13 TIME=HH:MM - 14:02)
 (MCX FILE - C:\USERS\RAUL\DESKTOP\IMPELLER METRICO_D60.MCX-6)
 (NC FILE - C:\USERS\RAUL\DOCUMENTS\MY MCAMX6\MILL\NC\IMPELLER METRICO_D60.NC)
 (MATERIAL - ALUMINUM MM - 2024)
 (T240| 6. BALL ENDMILL |H240)
N100 G21
N102 G0 G17 G40 G80 G90 G94 G98
N104 G0 G28 G91 Z0.
N106 G0 G28 X0. Y0.
 ( 6. BALL ENDMILL |TOOL - 240|DIA. OFF. - 240|LEN. - 240|TOOL DIA. - 6.)
N108 T240 M6
N110 G0 G54 G90 X.882 Y-19.862 C147.305 B-46.061 S1591 M3
N112 G43 H240 Z44.414
N114 Z36.593
N116 G1 Z26.593 F63.6
N118 X1.917 Y-19.076 Z26.952 C146.668 B-47.74 F127.3
N120 X2.993 Y-18.3 Z27.253 C146.063 B-49.422
N122 X4.1 Y-17.667 Z27.473 C145.652 B-51.187
N124 X5.233 Y-17.04 Z27.639 C145.262 B-52.954
N126 X6.107 Y-16.63 Z27.714 C145.208 B-54.224
N128 Z37.714 F63.6
N130 G0 Z45.321
N132 Z45.494
N134 X3.913 Y-16.907
N136 C142.109 B-51.056
N138 Z45.599
N140 X1.66 Y-17.048
N142 C138.724 B-47.978
  
```

Figura 4.32: Códigos G.

## 4.5 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DEL PROTOTIPO DE FRESADORA VERTICAL CNC DE 5 EJES.

### 4.5.1. Cero absoluto o referencia de la fresadora.

La fresadora necesita para mecanizar un punto de referencia, esto se realiza en el Mach3 con la referencia de cada eje, los cuales se van a trasladar hasta los finales de carrera, en donde las coordenadas son cero.

En la figura 4.33 se puede observar el punto de referencia donde los carros se posicionan y esperan la orden de inicio.

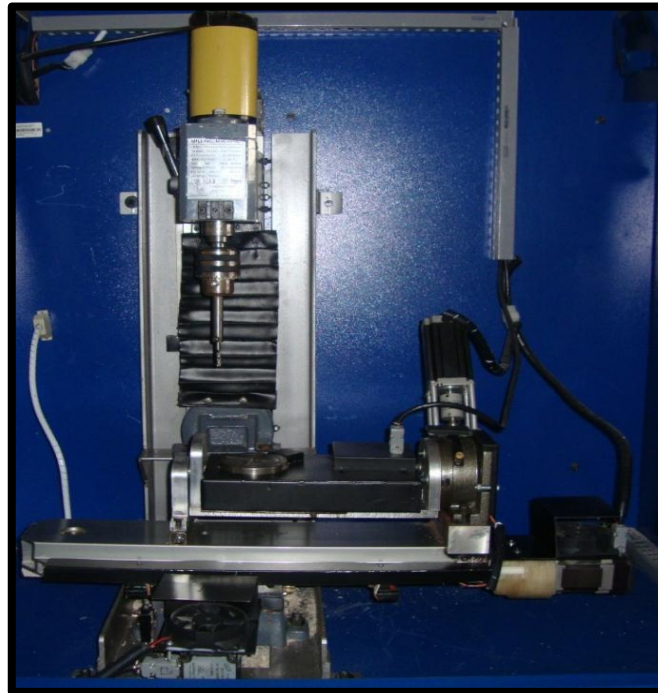


Figura 4.33: Punto de referencia o cero absoluto.

#### 4.5.2. Mecanizado como fresadora de 3 ejes.

Para la prueba de mecanizado como Fresadora de 3 ejes, se diseñó una pieza simple que contenga el mecanizado en 3 ejes como se observa en la figura 4.34, este diseño se realiza con la ayuda del software SolidWorks.

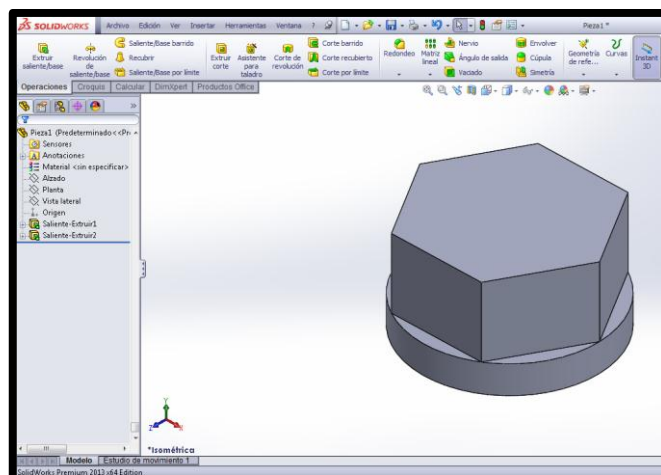
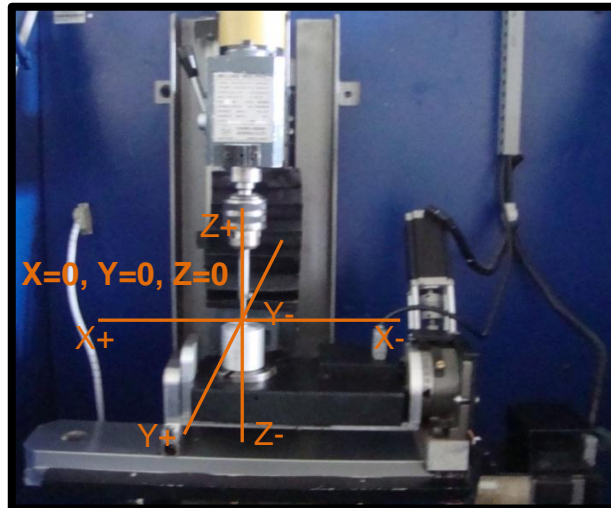


Figura 4.34: Diseño de la pieza de fresado en SolidWorks.



**a. Referencia de la pieza para fresado.**

Se parte del home de la máquina, para mover manualmente cada uno de los ejes, guardando los valores en el sistema de coordenadas de trabajo (G54). La figura 4.35 muestra el cero pieza.



**Figura 4.35: Cero pieza para el fresado.**

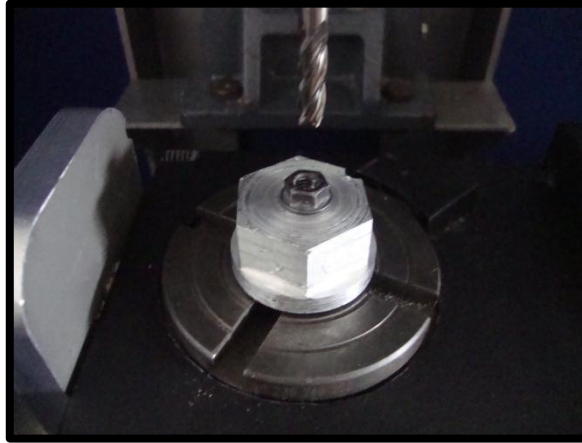
**b. Mecanizado de la pieza para fresadora de 3 ejes.**

Previamente se realiza el diseño y el mecanizado en programas como se describió en la sección 4.4, donde se obtiene los códigos G, para ingresar a Mach3 (sección 4.2.5). Se procede a correr el programa, en la figura 4.36 se muestra el mecanizado en fresadora 3 ejes.



**Figura 4.36: Mecanizado en fresadora de 3 ejes.**

Una vez terminado el mecanizado obtenemos la pieza como se observa en la figura 4.37.

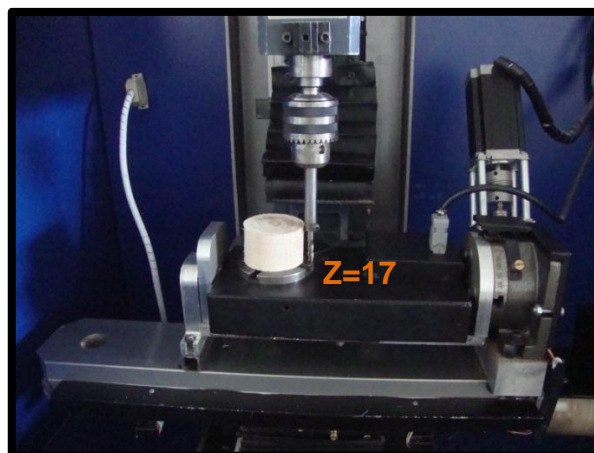


**Figura 4.37: Pieza de fresado.**

#### **4.5.3. Mecanizado como fresadora de 5 ejes.**

##### **a. Referencia de la pieza para fresado secuencial en 5 ejes.**

Para este caso en especial moveremos manualmente el eje “Z” hasta colocar la punta de la fresa lo más cercano posible a la mesa de trabajo con ayuda de un calibrador de láminas (espesor de la lámina de 0.5mm), una vez en esa posición Z tomará el valor de 17mm, como se observa en la figura 4.38.



**Figura 4.38: Cero pieza en Z.**

Nota: Esta compensación de altura se la debe realizar también en el software CAM.

Para los valores de X, Y se parte del home de la máquina para mover manualmente los ejes principales X, Y, Z y colocarnos en el centro del material a mecanizar, como se observa en la figura 4.39.



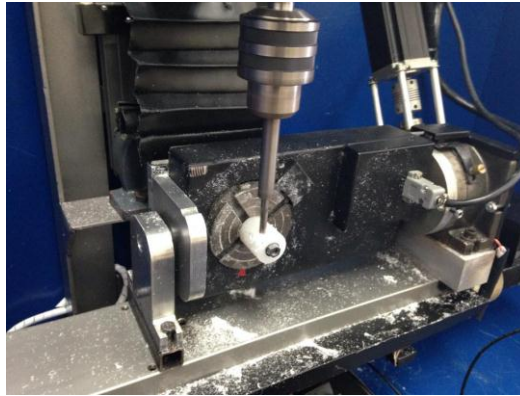
**Figura 4.39: Cero pieza en X, Y.**

Todos los valores se los guardara en el sistema de coordenadas de trabajo (G54).

**b. Mecanizado de la pieza para fresadora posicional de 5 ejes.**

Previamente se realiza el diseño y el mecanizado en programas como se describió en la sección 4.4, donde se obtiene los códigos G, para ingresar a Mach3 (sección 4.2.5).

El cero pieza en este caso estará ubicado de acuerdo al mecanizado a realizar y luego se procede a correr el programa, en la figura 4.40 se muestra el mecanizado en fresadora posicional de 5 ejes.



**Figura 4.40: Mecanizado en fresadora de 5 ejes.**

## **4.6 PRUEBAS, RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

### **4.7.1. Pruebas de corriente en los motores a paso.**

Para el presente análisis se colocará el amperímetro en una bobina de cada uno de los 5 ejes como se muestra en la figura 4.41, y se realizara pruebas de penetración que van desde el 1mm hasta los 5mm en un eje de aluminio de 1 pulgada de diámetro.



**Figura 4.41: Corriente en el eje "Z".**

Los valores obtenidos se muestran en la tabla 4.4.

#### 4.7.2. Pruebas de velocidad del husillo.

Para verificar la velocidad del husillo se utilizara un Tacómetro infrarrojo como se observa en la figura 4.42, para esta prueba se realizar con velocidad programada del husillo y se la compara con los valores medimos en el Tacómetro.

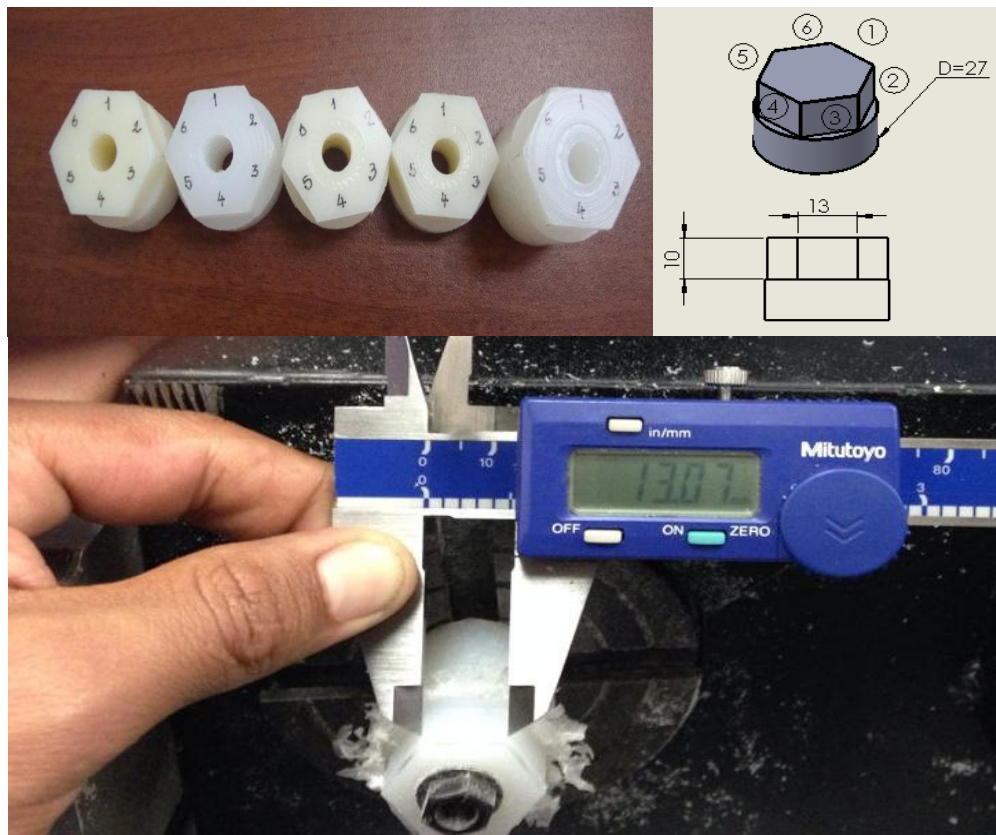


**Figura 4.42: Pruebas de velocidad del husillo.**

La tabla 4.5 muestra la velocidad cuando el mecanismo de trasmisión del husillo se encuentra en velocidad baja, mientras que la tabla 4.6 muestra la velocidad cuando el mecanismo de transmisión del husillo se encuentra en velocidad alta.

#### 4.7.3. Pruebas para el fresado posicional en 4 ejes.

Se procedió a realizar cinco hexágonos en un eje de duralon de 27mm de diámetro, la longitud de los lados del hexágono será de 13mm y una altura de 10mm para poder determinar la resolución y precisión de la máquina se realiza la medición de cada uno de los lados de los cinco hexágonos, como se observa en la figura 4.43.

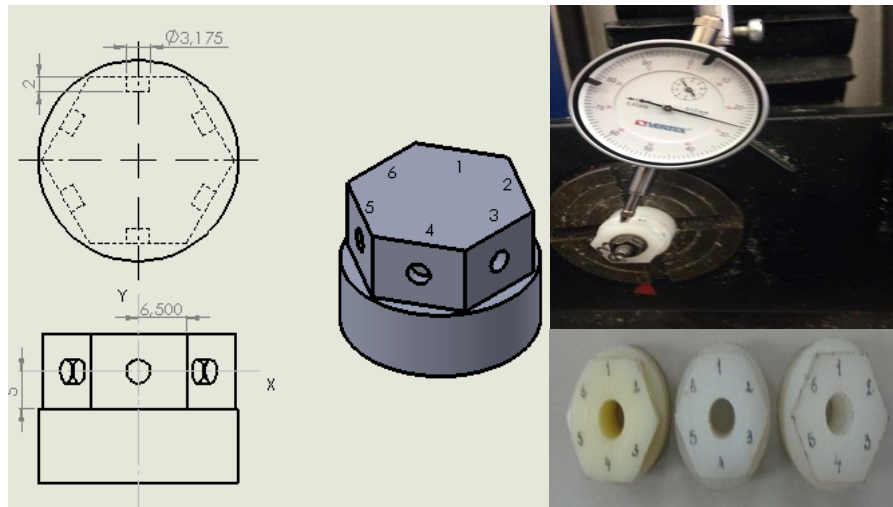


**Figura 4.43: Toma de muestras en el fresado.**

La toma de muestras se detalla en la tabla 4.7.

#### **4.7.4. Pruebas de taladrado posicional en 5 ejes.**

Para un mayor análisis se realiza un ciclo de taladrado en cada una de las caras de cinco hexágonos diferentes, con las dimensiones que se observa en la figura 4.44, con ayuda de un reloj comparador se determinó la precisión del eje "C", para ello el reloj comparador se colocó fijo al cabezal del eje "Z" y se ubico siempre a una misma altura y posición dentro del agujero del ciclo de taladrado para cada uno de los seis agujeros, si existiera una lectura en el reloj comparador se corrige esta lectura mediante la rotación del eje "C" por software y se obtiene el error en centésimas de grados del eje "C".



**Figura 4.44: Dimensiones del ciclo de taladrado.**

Se toma diferentes medidas como se detallan en la tabla 4.8.

#### **4.7.5. Pruebas de fresado simultáneo en 5 ejes.**

Las mediciones de precisión y resolución en el eje rotativo “A” se realizó en un mecanizado simultáneo y sus medidas se tomaron con un reloj comparador, como se observa en la figura 4.45, para ello el reloj comparador se colocó fijo al cabezal del eje “Z” y se ubico siempre a una misma altura y posición en los diferentes puntos del mecanizado, si existiera una lectura en el reloj comparador se corrige esta lectura mediante la rotación del eje “A” por software y se obtiene el error en centésimas de grados del eje “A”.



**Figura 4.45: Medidas tomadas con el reloj comparador.**

La tabla 4.9 muestra los datos de las mediciones tomadas en diferentes puntos del mecanizado.

#### 4.7.6. Resultados y análisis de resultados.

##### a. Resultados y análisis de resultados de pruebas de corriente en los motores a pasos.

Tabla 4.4: Valores de corriente vs penetración.

Profundidad [mm]	1	2	3	4	5
Corriente Medida (I) [A]	0.25	1.08	1.68	2.12	2.39

En esta prueba se observó que el valor máximo de corriente es en el arranque, es decir al instante de vencer la inercia de cada uno de sus ejes, que es igual a 2.6 A. Todos los valores obtenidos se presentan en la figura 4.46 la cual muestra que cuando aumenta la penetración aumenta la corriente por lo que no se debe sobrepasar los 5mm de profundidad de penetración en el aluminio.

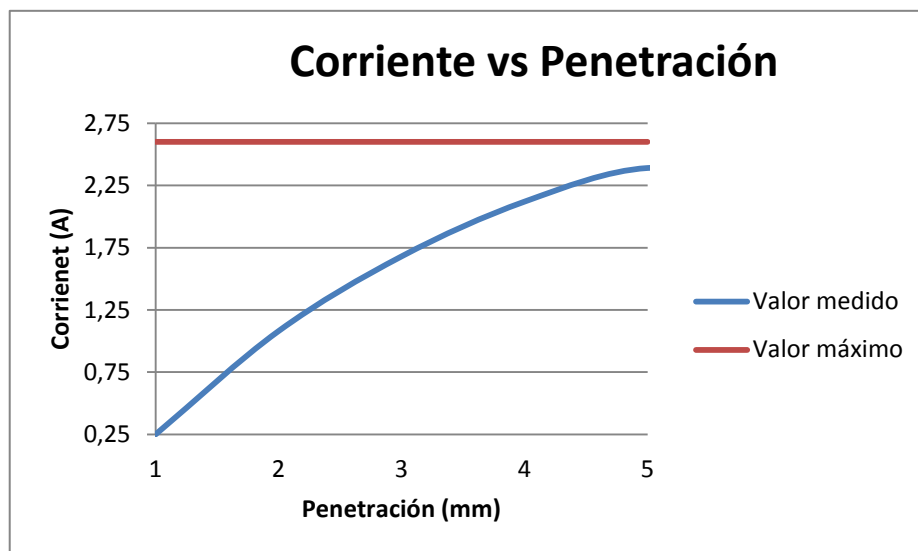


Figura 4.46: Corriente Vs Penetración.



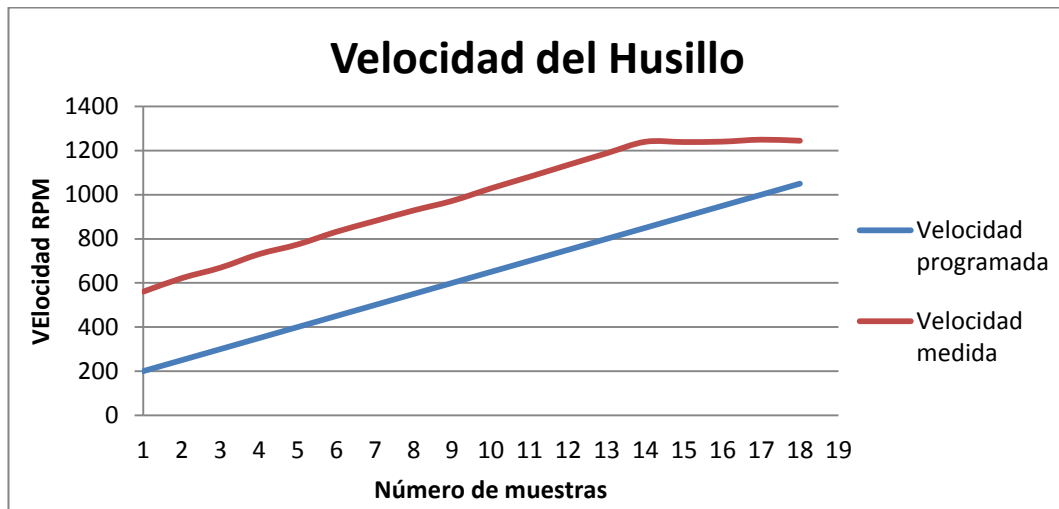
**b. Resultado y análisis de resultados en las pruebas de velocidad.**

La tabla 4.5 muestra la velocidad cuando el mecanismo de transmisión del husillo se encuentra en velocidad baja.

**Tabla 4.5: Velocidad del husillo en velocidad baja.**

N°	Velocidad programada (RPM)	Velocidad medida (RPM)
1	200	560,3
2	250	621,8
3	300	669,2
4	350	730,6
5	400	774,5
6	450	831,9
7	500	880,7
8	550	928,7
9	600	972,0
10	650	1028,6
11	700	1081,2
12	750	1135,1
13	800	1188,0
14	850	1240,1
15	900	1238,7
16	950	1240,7
17	1000	1249,5
18	1050	1244,6

Con los datos de la tabla 4.5 se realiza el siguiente gráfico estadístico:



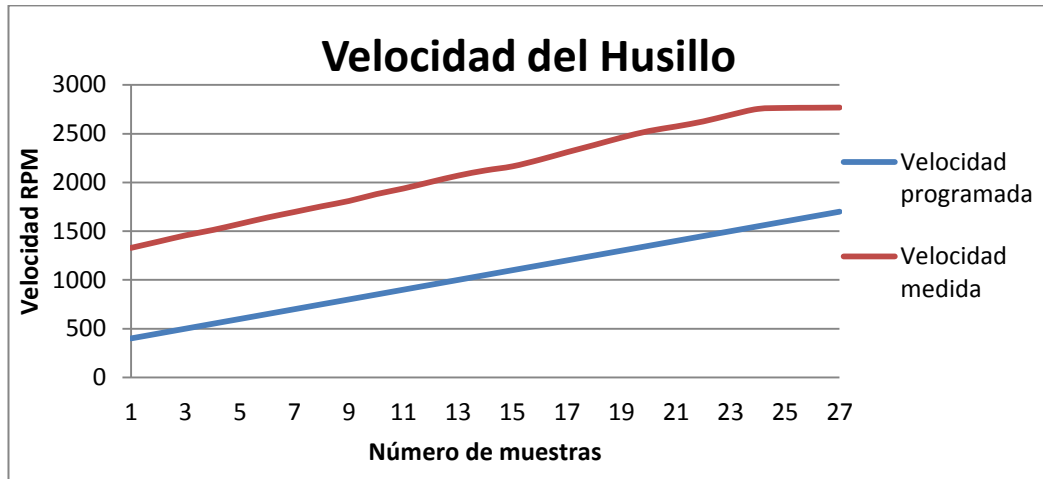
**Figura 4.47: Velocidad del husillo.**

La tabla 4.6 muestra la velocidad cuando el mecanismo de transmisión del husillo se encuentra en velocidad alta.

**Tabla 4.6: Velocidad del husillo en velocidad alta.**

N°	Velocidad programada (RPM)	Velocidad medida (RPM)	N°	Velocidad programada (RPM)	Velocidad medida (RPM)
1	400	1328,5	13	1000	2070
2	450	1392,6	14	1050	2123
3	500	1457,2	15	1100	2165
4	550	1512,1	16	1150	1233
5	600	1575,5	17	1200	2310
6	650	1639,6	18	1250	2384
7	700	1697,2	19	1300	2460
8	750	1755,3	20	1350	2527
9	800	1809,9	21	1400	2574
10	850	1880,0	22	1450	2626
11	900	1937,9	23	1500	2693
12	950	2005	24	1550	2754

Con los datos de la tabla 4.6 se realiza el siguiente grafico estadístico:



**Figura 4.48: Velocidad del husillo.**

Debido a que la tarjeta principal combo board rev 5 presenta una falla de fábrica al momento de su calibración para el ajuste de la velocidad del husillo, se debe tomar en cuenta las velocidades de la tabla 4.5 y 4.6 para realizar el mecanizado de cualquier pieza, como se observa en las figuras 4.47 y 4.48 la velocidad permanecerá constante al momento de alcanzar su valor máximo en la tarjeta combo board rev 5, por lo que las curvas llegaran a intersectarse entre la velocidad medida y la velocidad programada.

**c. Cálculo de la resolución de la máquina.**

El cálculo de la resolución del prototipo de Fresadora Vertical CNC de 5 ejes, se calcula independientemente para cada eje con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{p}{ppu} \tag{Ec. 4.2}$$

En donde:

$p(\text{mm}) =$  Paso del tornillo acoplado en el respectivo carro X, Y, Z.

$ppu =$  Pasos por unidad por cada eje.

Datos anteriormente obtenidos, cuyo valor es de  $p(\text{mm})=5\text{mm}$  y  $ppu = 400$ , para los ejes X, Y y Z, la resolución es:

$$R = \frac{5}{400} = 0.0125\text{mm}$$

Para la resolución en las mesas rotativas su unidad es el grado por lo que  $p$  para este caso es de  $10^\circ$ , ya que la relación de transmisión de las mesas es de 36:1, sus pasos por unidad es de 200. Así la resolución de las mesas rotativas es:

$$R = \frac{10^\circ}{200} = 0.05^\circ$$

#### **d. Cálculo de la precisión de la máquina.**

La precisión para cada uno de los ejes X, Y y Z se calcula con la siguiente ecuación:

$$P = R \pm J \quad \text{Ec. 4.3}$$

En donde:

$R$  = Resolución obtenida por cada eje, la cual fue calculada en la sección 4.7.1.

$J$  = Juego característico de los tornillos acoplados en cada una de las estructuras móviles del prototipo fresadora vertical CNC de 5 ejes.

En los Carros X, Y y Z se encuentran instalados husillos a bolas, el juego axial en cada uno de estos es de 0.01mm (ver ANEXO I), entonces  $J_x = J_y = J_z = \pm 0.01$ .

Según estas condiciones y dado el juego en cada uno de los ejes, la precisión es aproximadamente:

$$P = (0.0125 + 0.03)\text{mm}$$

$$P = 0.0425\text{mm}$$

Para las mesas rotativas existe un juego de  $0.05^\circ$ , reemplazando este valor en la ecuación 4.3 obtenemos el siguiente valor:

$$P = R + J$$

$$P = 0.05^\circ + 0.05^\circ$$

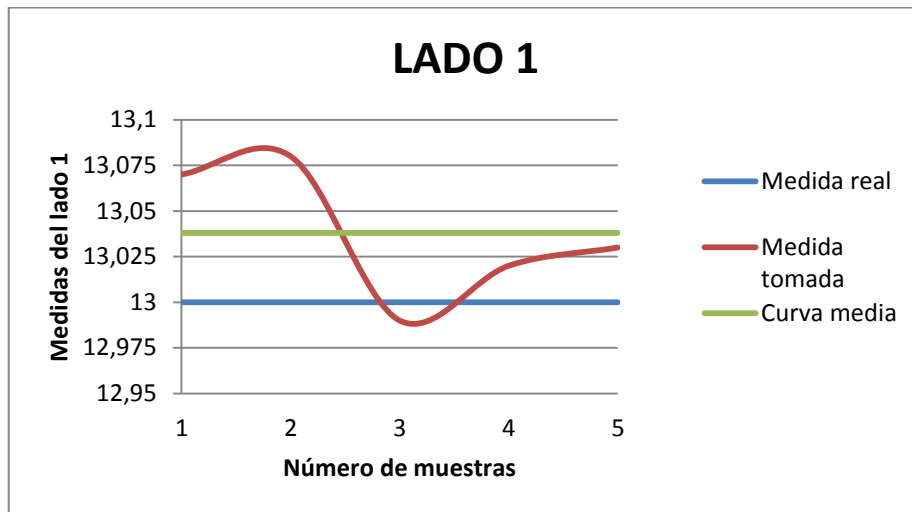
$$P = 0.1^\circ$$

**e. Resultados y análisis de resultados para el fresado posicional de 4 ejes.**

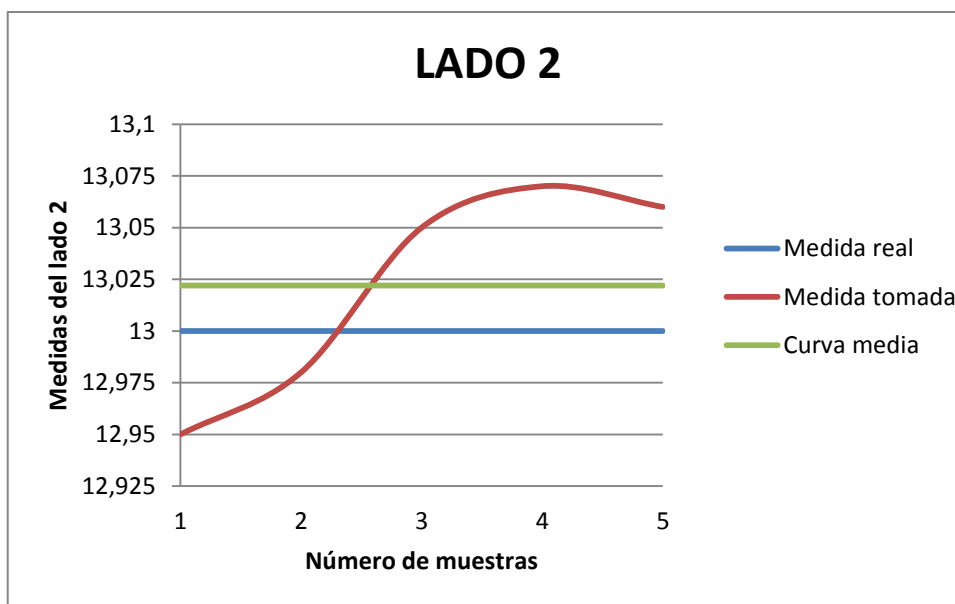
**Tabla 4.7: Muestras del fresado.**

<b>Fresado</b>						
<b>No. Muestras</b>	<b>Medidas tomadas</b>					
	<b>Lado 1 mm</b>	<b>Lado 2 mm</b>	<b>Lado 3 mm</b>	<b>Lado 4 mm</b>	<b>Lado 5 mm</b>	<b>Lado 6 mm</b>
1	13.07	12.95	13.08	12.97	13.03	12.97
2	13.08	12.98	13.05	12.99	13.04	12.95
3	12.99	13.05	13.03	13.05	13.06	13.06
4	13.02	13.07	13.06	13.03	13.09	13.02
5	13.03	13.06	12.98	13.07	13.08	13.06
<b>Promedio</b>	13.038	13.022	13.04	13.022	13.06	13.012
<b>Promedio total</b>					<b>13.0323</b>	

Con los datos de la tabla 4.7 se realizan los siguientes gráficos estadísticos:



**Figura 4.49: Medición lado 1.**



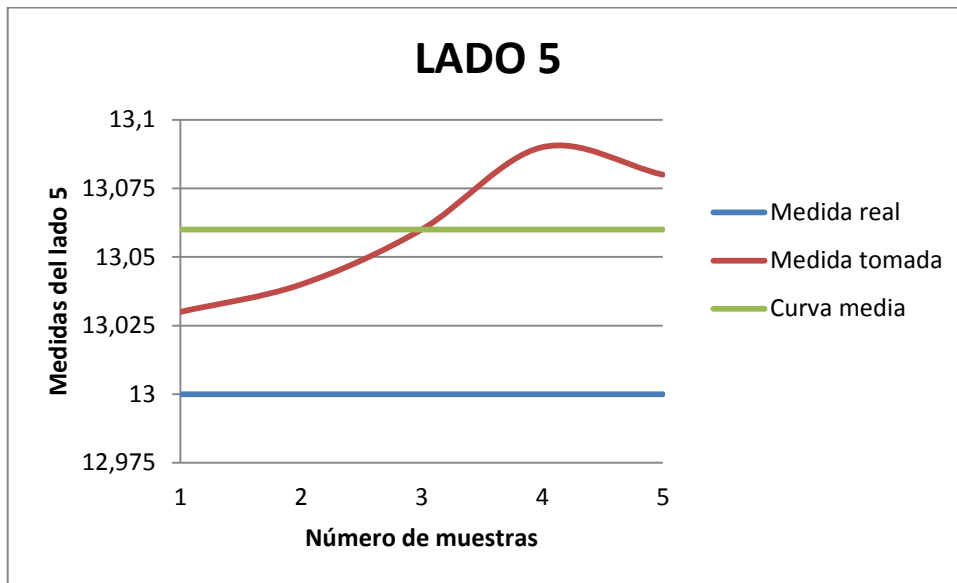
**Figura 4.50: Medición lado 2.**



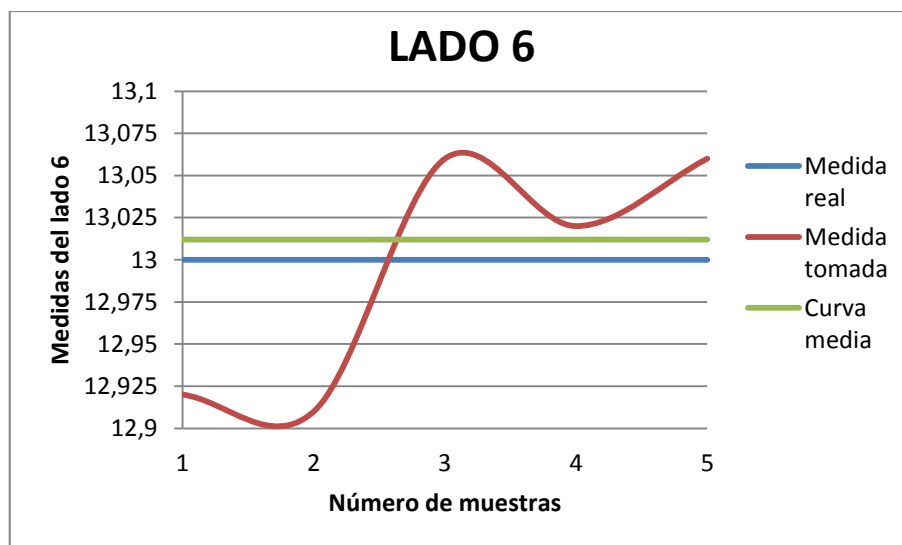
**Figura 4.51: Medición lado 3.**



**Figura 4.52: Medición lado 4**



**Figura 4.53: Medición lado 5.**



**Figura 4.54: Medición lado 6.**

De la figura 4.54 que es la más crítica, se puede concluir que al comparar la medida real con las medidas de muestreo y la curva media, el lado seis de la muestra 2 presenta una variación máxima. Luego de realizar los cálculos de los promedios y promedio total de la tabla 4.7 se puede determinar que la resolución y precisión son iguales y con un valor de 0.0323mm, esto quiere decir que la máquina está dentro de los



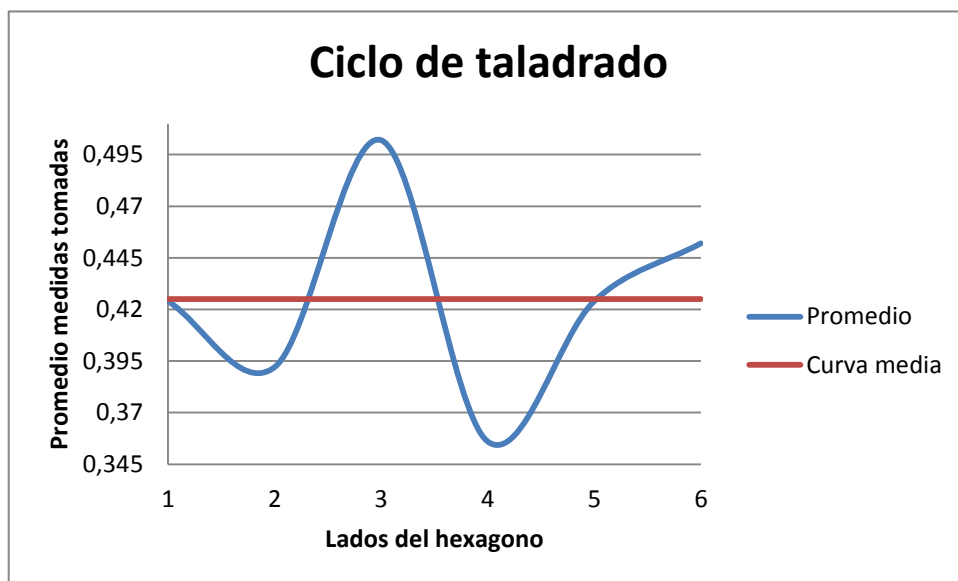
parámetros de diseño de precisión igual a 0.0425mm, calculado en la sección 4.7.6 literal d.

**f. Resultados y análisis del taladrado posicional en 5 ejes.**

**Tabla 4.8: Muestras de él ciclo de taladrado.**

Ciclo de Taladrado						
No. Muestras	Medidas tomadas					
	0°-60° (°)	60°-120° (°)	120°-180° (°)	180°-240° (°)	240°-300° (°)	300°-360° (°)
1	0,5	0,51	0,40	0,20	0,45	0,41
2	0,39	0,31	0,65	0,50	0,34	0,40
3	0,36	0,41	0,39	0,29	0,50	0,51
4	0,40	0,35	0,58	0,38	0,39	0,52
5	0,47	0,38	0,49	0,41	0,44	0,42
<b>Promedio</b>	<b>0,424</b>	<b>0,392</b>	<b>0,502</b>	<b>0,356</b>	<b>0,424</b>	<b>0,452</b>
<b>Promedio total</b>						<b>0,425</b>

Con los datos de la tabla 4.8 se realiza el siguiente gráfico estadístico:



**Figura 4.55: Medición de 0° a 360°.**

De los datos obtenidos en la tabla 4.8, luego de realizar los cálculos del promedio y el promedio total se puede concluir que este prototipo presenta una resolución de  $0.425^\circ$ , y como se puede observar en la figura 4.55 en las muestras 3 y 5 que son los valores más críticos, se puede mirar que existe una mayor variación, estos valores se tomaron para calcular la precisión del prototipo, que es igual a  $0.146^\circ$ . Para mejorar la resolución del prototipo se debe sustituir la mesa rotativa actual por otra de mejores características.

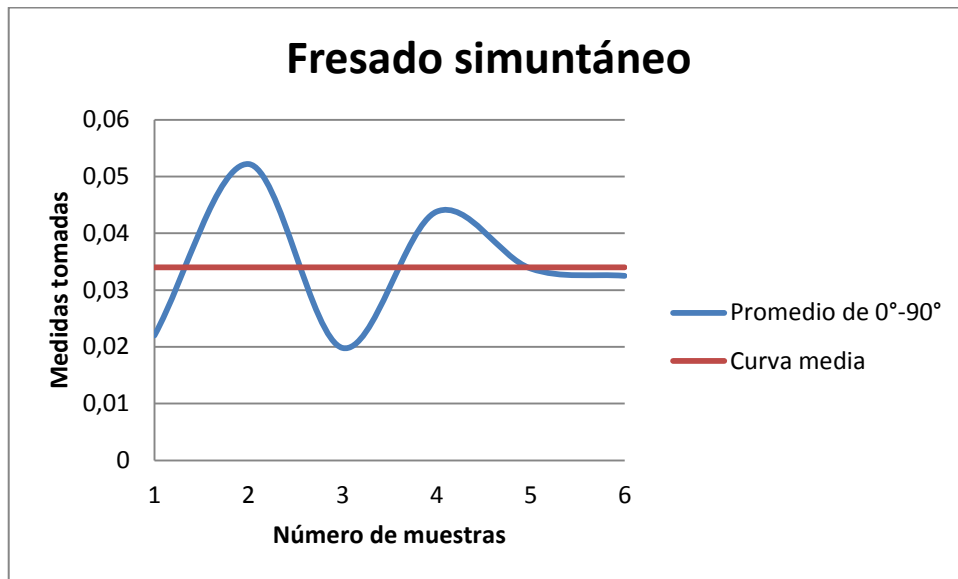
**g. Resultados y análisis de resultados del fresado secuencial con 5 ejes.**

La tabla 4.9 muestra los datos de las mediciones tomadas en los diferentes puntos del mecanizado secuencial con cinco ejes.

**Tabla 4.9: Datos de las mediciones tomadas**

Fresado Simultáneo						
No. Muestras	Medidas tomadas					
	0°-15° (°)	0°-30° (°)	0°-45° (°)	0°-60° (°)	0°-75° (°)	0°-90° (°)
1	0,028	0,05	0,019	0,045	0,030	0,025
2	0,015	0,055	0,020	0,040	0,035	0,035
3	0,02	0,045	0,025	0,050	0,040	0,045
4	0,025	0,059	0,015	0,040	0,030	0,050
<b>Promedio</b>	<b>0,022</b>	<b>0,0522</b>	<b>0,0198</b>	<b>0,0438</b>	<b>0,0338</b>	<b>0,0325</b>
<b>Promedio total</b>						<b>0,034</b>

Con los datos de la tabla 4.9 se realiza el siguiente gráfico estadístico:



**Figura 4.56: Mediciones de 0° a 90°.**

De los datos obtenidos en la tabla 4.9, luego de realizar los cálculos del promedio y promedio total se puede concluir que este prototipo presenta una resolución y precisión de  $0.034^\circ$  para el eje "A". En la figura 4.56 se observa que en las muestras 1 y 2 existe una mayor variación y conforme se aumenta el número de muestras esta variación va disminuyendo. Para mejorar la resolución del prototipo se debe sustituir la mesa rotativa actual por otra de mejores características.

#### **4.7 MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.**

Ver los detalles de la operación y mantenimiento de la fresadora vertical CNC de 5 ejes en el ANEXO J.

#### **4.8 ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO.**

La máquina ha sido implementada satisfactoriamente cumpliendo su funcionamiento en el Laboratorio CNC; por lo cual se hace necesario cuantificar su valor económico para identificar la inversión realizada por la Universidad De las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

Para la implementación de la proyecto se realizó el consumo de materiales eléctricos, electrónicos, dispositivos de control, materiales mecánicos, procesos de maquinado que se detallan en la siguiente tabla 4.10.

**Tabla 4.10: Lista de materiales y precios**

<b>ÍTEM</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANT.</b>	<b>P.UNIT</b>	<b>TOTAL</b>
1	Fresadora Vertical	1	2000	2000
2	Husillos a bolas	3	150	450
3	Motores a pasos	5	400	2000
4	Servo Drivers	5	250	1250
5	Tarjeta lectora de códigos G	2	400	800
6	Fuente de CC	1	280	280
7	Material Eléctrico	1	300	300
8	Material Mecánicos	1	500	500
5	Carcasa y Mesa	1	250	250
6	Mano de obra	2	2500	5000
			<b>Total</b>	<b>\$12830</b>

Con todos las inversiones anteriormente mencionados se realizó una inversión total de 7830 USD para el presente proyecto.

Máquinas semejantes al proyecto están a un costo de \$ 25525 USD, como se pudo observar en la sección 1.1.4.

Al comparar el valor de las máquinas semejantes con el valor del proyecto, se determinar que el costo de fabricación es menor e igual a 12695 USD; por ello se concluye que la reproducción del proyecto es viable y con aspiración a grandes beneficios si se lo escala a nivel industrial.

#### **4.9 VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS.**

La hipótesis planteada para el proyecto es:

¿Se podría diseñar y construir un prototipo de centro de mecanizado vertical de 5 ejes para el laboratorio CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga?

Se pudo diseñar e implementar el prototipo de Centro de Mecanizado Vertical de 5 Ejes de control numérico computarizado con la ayuda del Laboratorio CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga; este proyecto será útil para prácticas del mismo laboratorio ya que es de investigación científica.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES:

- Se diseñó y construyó un Prototipo de Centro de Mecanizado Vertical CNC de 5 ejes para el laboratorio CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas-Espe Extensión Latacunga, partiendo de un prototipo de fresadora vertical de 3 ejes y con la ayuda de las máquinas CNC existentes en el laboratorio.
- Para el diseño mecatrónico se recopiló información sobre el funcionamiento y operación de fresadoras y prototipos de fresadoras de 5 ejes de Control Numérico Computarizado, siendo posible el contacto con algunas personas del extranjero de páginas web como Hossmachine de EE.UU y Alex-Portaherramientas de España.
- Se diseñó el sistema: mecatrónico con los parámetros de funcionamiento planteados para el prototipo y con ayuda de software de diseño SolidWorks 2012 se pudo realizar análisis de esfuerzos estáticos y ver las propiedades físicas de los elementos mecánicos del prototipo.
- Se seleccionó los elementos para el sistema: mecatrónico dependiendo de los valores de cálculo del diseño, la manufactura existente en el mercado y el costo de los elementos siendo estos muy elevados en el mercado nacional por lo que se optó por adquirirlos en el extranjero a un precio razonable.
- Se implementó el sistema de control para gobernar los actuadores acoplados a cada eje de movimiento del prototipo, siendo este en

lazo abierto debido a que se utilizó motores a pasos con drivers de gran precisión.

- El control de la máquina se lo realizó mediante software (Mach3), el mismo que trabaja conjuntamente con dos tarjetas principales (Combo Board) (DB25); debido a sus bajos costos para satisfacer las necesidades del diseño del prototipo de fresadora vertical CNC de 5 ejes, obteniendo a la final un HMI.
- Se realizó pruebas de funcionamiento y mecanizado para analizar los resultados y encontrar valores de resolución y precisión de prototipo, Obteniendo los siguientes resultados: en un fresado de 4 ejes la resolución y precisión son iguales a 0.0323mm, en tanto que para los ejes rotativos para un fresado de 5 ejes estos valores cambian; para el eje “C” la resolución es de 0.425° y una precisión de 0.146°, y el eje “A” presenta una resolución y precisión igual a 0.034°.
- Con la implementación de este sistema automático de Fresadora vertical CNC de 5 ejes, los docentes y estudiantes de las diferentes carreras de la ESPE-L, pueden hacer uso de la máquina en el Laboratorio CNC, para prácticas relacionadas con las asignaturas de FMS y CAD/CAM, con el fin de que puedan lograr una mayor comprensión acerca de este tema.

## **5.2 RECOMENDACIONES:**

- Implementar un cambio automático de herramientas.
- Implementar un controlador por hardware de 5 ejes para el presente prototipo de fresadora vertical CNC.
- Cambiar las mesas rotativas actuales por otras de mayor resolución y precisión para obtener mejores resultados en el mecanizado de piezas complejas.

- En proyectos a gran escala se recomienda utilizar un controlador que sea hardware ya que en software se puede producir interferencia en la comunicación.
- Reemplazar la tarjeta controlado combo board rev.5 con la finalidad de corregir errores en la velocidad del husillo.
- Verificar de forma regular los parámetros de configuración o calibración del fresadora vertical CNC de 5 ejes dentro del software Mach3 sección 4.2.4, con el fin de arreglar algún tipo de desconfiguración que se haya dado, además para obtener los mejores resultados de mecanizado posibles.
- Antes de operar la máquina se deben conocer sus características técnicas, tales como: recorridos de los ejes, velocidades máximas del husillo, materiales que se pueden mecanizar, etc., para lo cual se recomienda leer primero el manual de operación del mismo que se encuentra en el ANEXO J.
- Se recomienda seguir las normas de seguridad tanto para la máquina como para el operario, antes, durante y después del mecanizado, ya que la máquina aunque es un prototipo puede causar lesiones por quemaduras o corte, además ayuda al operario para que se acostumbre al momento de utilizar una máquina a nivel industrial.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, J. Actuadores eléctricos y mecánicos. *Actuadores eléctricos y mecánicos*. Instituto Universitario Politécnico "Santiago Mariño", Jalisco, Puerto Vallarta, Venezuela.
- Alicante, N. (14 de 01 de 2009). *SHOPTRONICA S.L.U.* Recuperado el 26 de 11 de 2012, de SHOPTRONICA S.L.U.: <http://www.shoptronica.com/interruptor-de-palanca/2268-micro-interruptor-final-de-carrera.html>
- ArthurGill, K. a. (2007). *Computer Numerical Control Simplified*. Illustrated.
- Artsoft, C. (01 de 01 de 2006). *Newfangled Solutions*. Recuperado el 03 de 12 de 2012, de Newfangled Solutions: <http://www.machsupport.com/software/mach3/>
- Barragán, M. (02 de 01 de 2011). *HERTZ ELECTRONICA*. Recuperado el 26 de 11 de 2012, de 5HERTZ ELECTRONICA: [http://5hertz.com/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=360](http://5hertz.com/index.php?main_page=product_info&products_id=360)
- Bolaños, D. (04 de 03 de 2013). *Apuntes de Electrónica - Informática - Tecnología*. Recuperado el 01 de 05 de 2013, de Apuntes de Electrónica - Informática - Tecnología: <http://www.bolanosdj.com.ar/index2.htm>
- Cullins, J. (23 de 12 de 2007). *CAMPBELLDESIGNS*. Recuperado el 26 de 07 de 2012, de CAMPBELLDESIGNS: <http://campbelldesigns.net/combo-board-mach-files.php>
- Dani, R. (01 de 12 de 2008). *CORIOLIS*. Recuperado el 26 de 11 de 2012, de CORIOLIS: <http://coriolisblog.wordpress.com/2008/12/01/motores-industriales-parte-i/>

- Fagor, A. (20 de 01 de 2011). *FAGOR AUTOMATION*. Recuperado el 23 de 09 de 2012, de FAGOR AUTOMATION: <http://www.fagorautomation.com/nuevas-soluciones-de-corte-y-taladrado/#>
- Flores, H. &. Tecnología de los materiales en la construcción. *El Acero*. Universidad Católica "Santo Toribio de Mogrovejo", Chiclayo.
- Geckodrive. (25 de 04 de 2008). *GECKODRIVE*. Recuperado el 20 de 01 de 2013, de GECKODRIVE: [http://www.geckodrive.com/gecko/images/cms\\_files/G202%20REV-16%20MANUAL.pdf](http://www.geckodrive.com/gecko/images/cms_files/G202%20REV-16%20MANUAL.pdf)
- Gerling. (1996). *Alrededor de las Máquinas - Herramientas*. Mexico D. F.: Reverté Ediciones, páginas 12-22.
- Gordón, N. *Diseño e implementación de torno fresador de control numérico computarizado para el laboratorio CNC de la ESPE extensión Latacunga*. Escuela Politécnica del Ejercito, Latacunga, páginas 15, 26, 28.
- Gordon, T. (30 de 07 de 2010). *Cnc Toolkit Multiaxis Creative Machine*. Recuperado el 19 de 06 de 2012, de Cnc Toolkit Multiaxis Creative Machine: [http://www.cnc-toolkit.com/cnc\\_5axisMill.htm](http://www.cnc-toolkit.com/cnc_5axisMill.htm)
- Hagiz, G. (19 de 04 de 2007). *NUMERYX INC*. Recuperado el 08 de 06 de 2012, de NUMERYX INC: <http://numeryx.com/cnc/5axes.htm>
- Hannifin, P. (13 de 12 de 2007). *THOMASNET*. Recuperado el 26 de 11 de 2012, de THOMASNET: <http://news.thomasnet.com/fullstory/Brushless-Servo-Motor-features-inertia-optimized-design-537232>

- Hill, M. (13 de 09 de 2013). *MDA Precision*. Recuperado el 23 de 10 de 2013, de MDA Precision: <http://www.mdaprecision.com/blog/find-a-5-axis-mill-thats-just-right-for-you/>
- Hoffmann, I. (27 de 12 de 2013). *IZARO MANUFACTURING TECHNOLOGY*. Recuperado el 29 de 12 de 2013, de IZARO MANUFACTURING TECHNOLOGY: <http://www.izaro.com/contenidos/ver.php?id=es&se=5&su=52&co=1384179197>
- Kalpakjian, S. (2000). *Manufacturing Engineering and Technology*. Tokio: Prentice Hall, página 532.
- Karlo, A. (2008). *Secrets of 5 - Axis Machining*. New York: Library of Congress Catalogin, páginas 15-20.
- Karma, S. (26 de 05 de 2012). *TARINGA*. Recuperado el 18 de 09 de 2012, de TARINGA: <http://www.taringa.net/posts/apuntes-y-monografias/10892542/Fresadora-procedimientos-y-tipos-de-fresas.html>
- Kelinginc. (03 de 12 de 2010). *KELINGINC*. Recuperado el 20 de 01 de 2013, de KELINGINC: <http://www.kelinginc.net/KL-4030.pdf>
- KRAR. (2008). *Tegñologia de las Máquinas Herramienta*. Alfaomega, página 145.
- Larburu, N. (1990). *Máquinas Prontuario Técnicas Máquinas Herramientas*. Madrid: Paraninfo S.A, página 489.
- LATINCASA. (05 de 07 de 2010). *Latincasa Confianza en Conducccón Eléctrica*. Recuperado el 11 de 11 de 2012, de Latincasa Confianza en Conducccón Eléctrica: <http://www.latincasa.com.mx/>
- Mandado, E. M. (1995). *Instrumentación Electrónica*. Barcelona: Marcombo, página 20.

- Mena, A. Conversión de un torno convencional a uno por control numérico computarizado para el laboratorio cnc de la ESPE Extensión Latacunga. *Catálogo técnico husillo de bolas*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga, página 48.
- Ming, X. (2003). *Fundamentals of Robotics*. Singapore: World Scientific.
- Mining, L. I. (05 de 06 de 2012). *LBA Industrial Mining*. Recuperado el 24 de 11 de 2012, de LBA Industrial Mining: <http://www.lbaindustrial.com.mx/que-es-un-encoder/>
- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: PEARSON Educación, páginas 185, 289, 552.
- Niebla, I. (16 de 01 de 2007). *INAER S.L.* Recuperado el 14 de 03 de 2012, de INAER S.L: <http://www.inaher.com/es/empresa.php>
- Pareto, L. (1976). *Formulario de Mecánica*. Barcelona, España: Ediciones CEAC, S.A, página 646.
- QuickSilver Controls, I. (06 de 25 de 2010). *Datasheet:QCI-DS008*. Recuperado el 13 de 03 de 2012, de Datasheet:QCI-DS008: [https://www.quicksilvercontrols.com/SP/DS/QCI-DS008\\_QCI-A23.pdf](https://www.quicksilvercontrols.com/SP/DS/QCI-DS008_QCI-A23.pdf)
- Rocha, J. &. Ingeniería de Control. *Introducción a los Sistemas de Control*. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey.
- Rodriguez, L. (28 de 04 de 2002). *Electrónica UNICROM*. Recuperado el 07 de 01 de 2014, de Electrónica UNICROM: [http://www.unicrom.com/Tut\\_EmbobinadoTransformadores.asp](http://www.unicrom.com/Tut_EmbobinadoTransformadores.asp)
- Rosselló, J. F. (20 de 03 de 2006). *UIB*. Recuperado el 06 de 12 de 2012, de UIB: <http://www.uib.es/depart/dfs/GTE/staff/jfont/InstrETI/daq6024e.pdf>

SANDIVIK. (12 de 05 de 2011). *SANDIVIK COROMANT*. Recuperado el 29 de 11 de 2012, de SANDIVIK COROMANT: [http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/getting\\_started/machines\\_for\\_milling/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/getting_started/machines_for_milling/pages/default.aspx)

Sandivik, C. (1985). *Guía de fresado*. Coromant, página 8.

SEMAPRE. (25 de 04 de 2012). *SEMAPRE*. Recuperado el 29 de 06 de 2012, de [http://www.semacre.com.mx/images/equipos/equipos\\_thumbs/large/cnc\\_5.jpg](http://www.semacre.com.mx/images/equipos/equipos_thumbs/large/cnc_5.jpg)

Sensores. (02 de 05 de 2011). *SENSORES*. Recuperado el 03 de 11 de 2012, de SENSORES: <http://sensoresdeproximidad.blogspot.com/>

SKF. (2010). *Husillo de bolas*. SKF, página 10.

Smith, W. (2001). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. California: McGraw Hill, página 439.

Technology Inc, A. (29 de 05 de 2011). *AUTOMATION TECHNOLOGY INC*. Recuperado el 15 de 09 de 2012, de AUTOMATION TECHNOLOGY INC: <http://www.automationtechnologiesinc.com/products-page/breakout-boards/kl-db25-breakout-board>

Tecnología. (02 de 05 de 2012). *La tecnología Creacionista*. Recuperado el 29 de 11 de 2012, de La tecnología Creacionista: [http://latecnologiacreacionista.blogspot.com/2012\\_05\\_01\\_archive.html](http://latecnologiacreacionista.blogspot.com/2012_05_01_archive.html)

THK. (2010). *Guías Lineales*. THK, página 6.

TodoRobot. (24 de 06 de 2013). *Todo Robot*. Recuperado el 02 de 11 de 2013, de Todo Robot: <http://www.todorobot.com.ar/>

## GLOSARIO

### A

**ASTM:** American Society for Testing and Materials. Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.

**A36:** El acero A36, tiene una densidad de 7850 kg/m<sup>3</sup>. El acero A36 en barras, planchas y perfiles estructurales con espesores menores de 8 pulgadas (203.2mm)

### D

**DIN:** Deutsches Institut für Normung. Instituto Alemán de Normalización.

### G

**Geckodrive:** Controlador de velocidad y posición de motores a paso.

### H

**Hardware:** Todos los elementos físicos del computador o PLC.

### K

**KL 4030:** controlador de velocidad y posición de motores a paso.

### S

**Software:** Conjunto de programas que ejecuta un computador o PLC.

**SKF:** SvenkaKullagerFabriken AB

### T

**TTL:** Transistor-transistor logic. Lógica transistor a transistor.

# **ANEXOS**

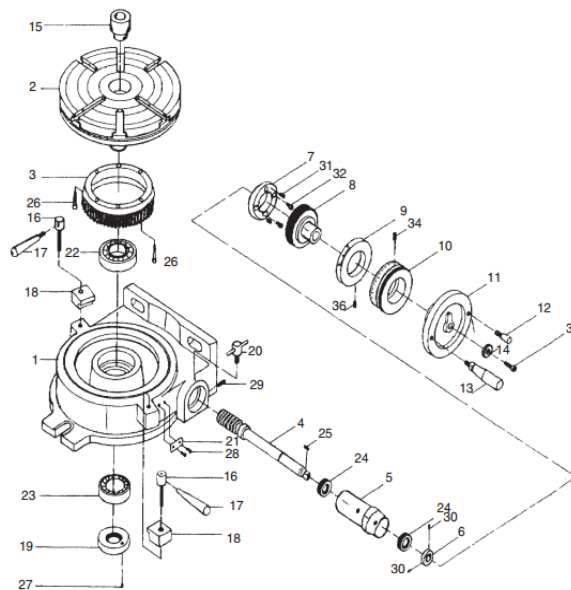
## ÍNDICE DE ANEXOS.

- ANEXO A PARTES MECÁNICAS DEL REDUCTOR DEL EJE A.
- ANEXO B CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÁNICAS, Y ELÉCTRICAS DEL MOTOR A PASO QCI-A23K.
- ANEXO C PLANOS MECÁNICOS.
- MEC001 ESTRUCTURA FRESADORA 5 EJES
  - MEC002 ESTRUCTURA DEL EJE X
  - MEC003 ESTRUCTURA DEL EJE Y
  - MEC004 ESTRUCTURA DEL EJE Z
  - MEC005 SOPORTE COLUMNA MATRIMONIO EJE Z
  - MEC006 SOPORTE RODAMIENTO INFERIOR EJE Z
  - MEC007 SOPORTE PARA RODAMIENTO EJE Z
  - MEC008 HUSILLO DE BOLAS Z
  - MEC009 ESTRUCTURA DEL CABEZAL
  - MEC010 SOPORTE PARA CABEZAL
  - MEC011 SOPORTE PARA TUERCA DE BOLAS EJE Z
  - MEC012 TUERCA DE BOLAS Z
  - MEC013 VÁSTAGO ALARGADOR PARA FRESA
  - MEC014 ESTRUCTURA DEL EJE A (ROTATIVO)
  - MEC015 BASE PARA MESA ROTATIVA A
  - MEC016 CUNA PARA EJE A



- MEC017 CONTRAPUNTO PARA EJE A
- MEC018 EJE CONTRAPUNTO PARA EJE A
- MEC019 TUBO SOPORTE PARA MOTOR
- MEC020 MATRIMONIO EJE A Y C
- MEC021 BASE PARA MOTOR EJE A
- MEC022 BASE CONTRAPUNTO
- MEC023 ESTRUCTURA DEL EJE C
- MEC024 ESTRUCTURA BANCADA PRINCIPAL
- ANEXO D ESQUEMA DE CONTROL Y POTENCIA.
- ANEXO E PINES DE LA TARJETA COMBO BOARD REV5.
- ANEXO F CARACTERÍSTICAS DE LA TARJETA KL-DB25.
- ANEXO G CARACTERÍSTICA DE LA TARJETA GECKODRIVER G202.
- ANEXO H CARACTERÍSTICAS DE LA TARJETA MICROSTEPPING DRIVER KL 4030.
- ANEXO I CARACTERÍSTICAS DE TUERCA DE HUSILLOS DE BOLAS BNT 2005-2.6Z
- ANEXO J MANUAL DE OPERACIÓN.
- ANEXO K PANTALLA DEL SOFTWARE MACH3 PARA 6 EJES.

### Rotary Table Parts Breakdown

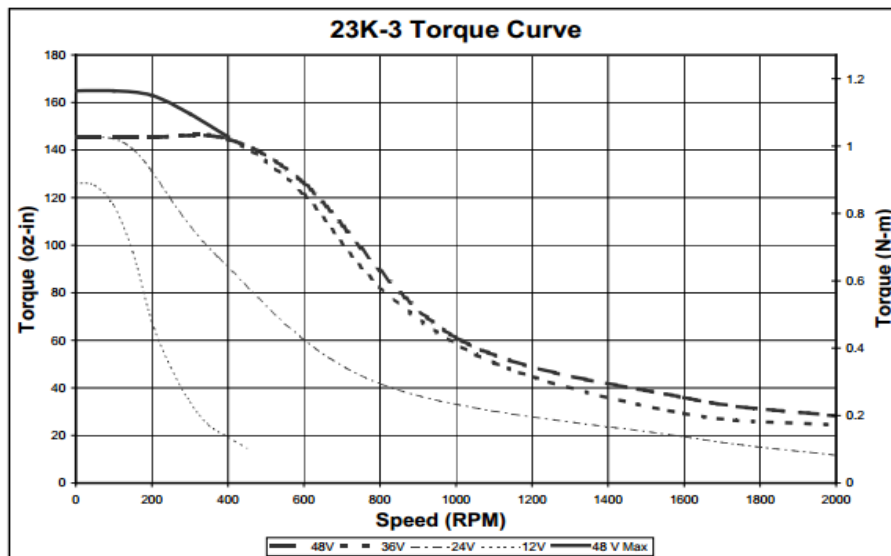


REF	PART #	DESCRIPTION
1	P1049001	MAIN BODY
2	P1049002	TABLE
3	P1049003	WORM GEAR
4	P1049004	WORM SHAFT
5	P1049005	ECCENTRIC HOUSING
6	P1049006	LOCK COLLAR
7	P1049007	HOLDING COVER
8	P1049008	ADJUSTMENT RING
9	P1049009	VERNIER RING
10	P1049010	MICRO COLLAR
11	P1049011	HANDWHEEL
12	P1049012	SMALL HANDLE
13	P1049013	HANDLE
14	P1049014	SPACER
15	P1049015	BUSHING
16	P1049016	CLAMP BOLT
17	P1049017	CLAMP HANDLE
18	P1049018	CLAMP

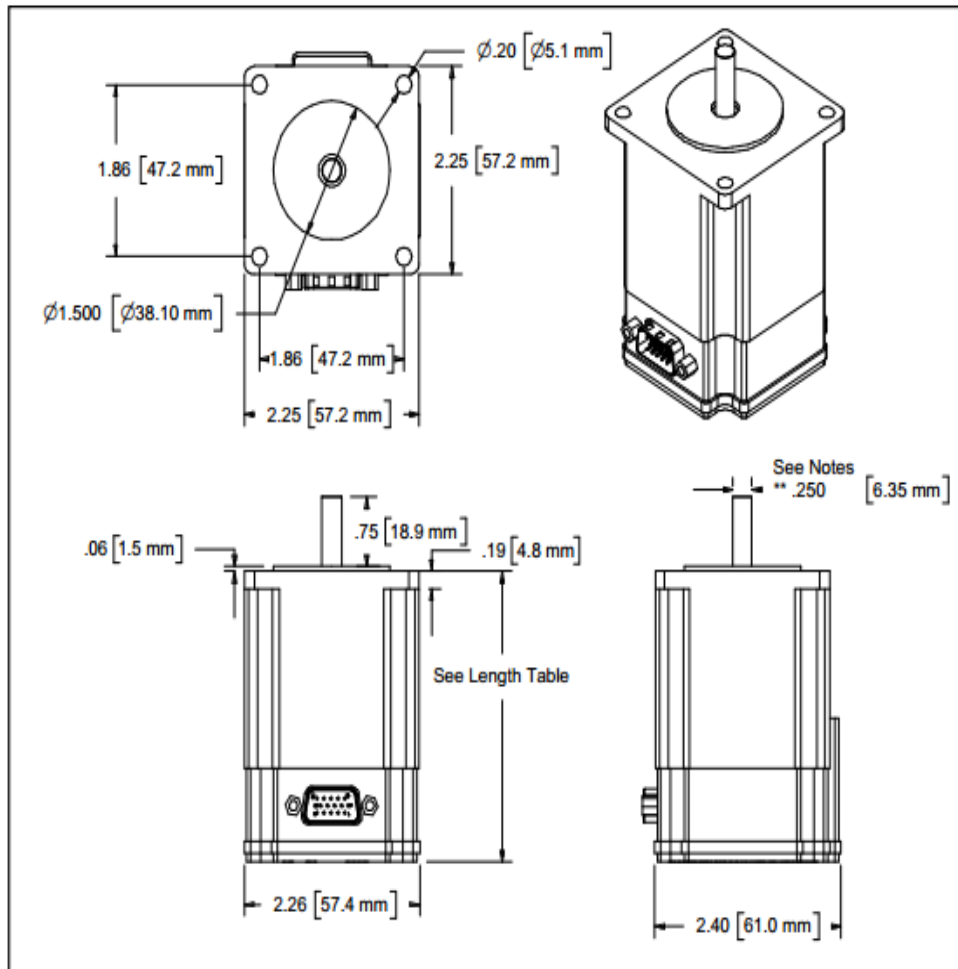
REF	PART #	DESCRIPTION
19	P1049019	LOCK NUT
20	P1049020	LOCK HANDLE
21	P1049021	POINTER
22	P1049022	BEARING 30 X 45 X 20T
23	P1049023	BEARING 25 X 42 X 4T
24	P1049024	SPACER
25	PK65M	KEY 4 X 4 X 7MM
26	PSB15M	CAP SCREW M5-.8 X 20
27	PSB18M	CAP SCREW M4-.7 X 8
28	P4000809	RIVET 2 X 5
29	PSS50M	SET SCREW M4-.7 X 20
30	PSS08M	SET SCREW M4-.7 X 5
31	PSS08M	SET SCREW M4-.7 X 5
32	PSB08M	CAP SCREW M4-.7 X 13
34	PSS07M	SET SCREW M5-.8 X 5
35	PSB27M	CAP SCREW M6-1. X 14
36	PSS07M	SET SCREW M5-.8 X 5

**General Motor Specifications**

Specifications	23L-1	23K-3	23L-3	23H-5	23H-1	23-3	23H-3	23-5	23T-7
Maximum Speed (RPM)	4000	2000	4000	4000	4000	2000	4000	2000	1000
48v Optimal Speed (RPM)	2500	600	1900	1000	2500	500	1500	200	400
Torque (oz-in / Nm) at Optimal Speed	30 0.22	130 0.92	55 0.39	120 0.85	30 0.22	110 0.78	43 0.30	225 1.60	220 1.55
Continuous Stall Torque oz-in / Nm	40 0.28	145 1.00	84 0.59	190 1.34	40 0.28	125 0.88	70 0.51	240 1.70	300 2.1
Peak Power (Mech. Watts)	80	58	84	95	78	47	60	47	65
Rotor Inertia oz-in <sup>2</sup> / Kg-m <sup>2</sup>	0.74 1.35E-5	1.50 2.7E-5	1.50 2.7E-5	2.3 4.2E-5	0.74 1.35E-5	1.36 2.5E-5	1.60 2.9E-5	2.3 4.2E-5	3.2 5.9E-5
Weight pounds / Kg	1.40 0.65	1.70 0.77	1.70 0.77	2.6 1.20	1.40 0.65	1.70 0.77	1.70 0.77	2.6 1.20	3.2 1.45
Maximum Driver Input Current (Amps - DC)	4.0	3.0	3.5	4.0	4.0	3.0	4.0	3.0	3.0
Maximum Radial Force(lbs) 0.55" from mounting face	15	15	15	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	20
Maximum Axial Force (lbs)	13	13	13	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	6
Notes					Use 23L-1 EOL	Use 23K-3 EOL	Use 23L-3 EOL	Use 23H-5 EOL	



### Mechanical Specifications



Motor Series	Length	Shaft diameter	Notes **
23L-1	2.7 [68 mm]	.250 [6.35 mm]	Shaft has .020 [.5 mm] flat
23K-3	3.2 [81 mm]	.250 [6.35 mm]	Shaft has .020 flat

**Anexo C**

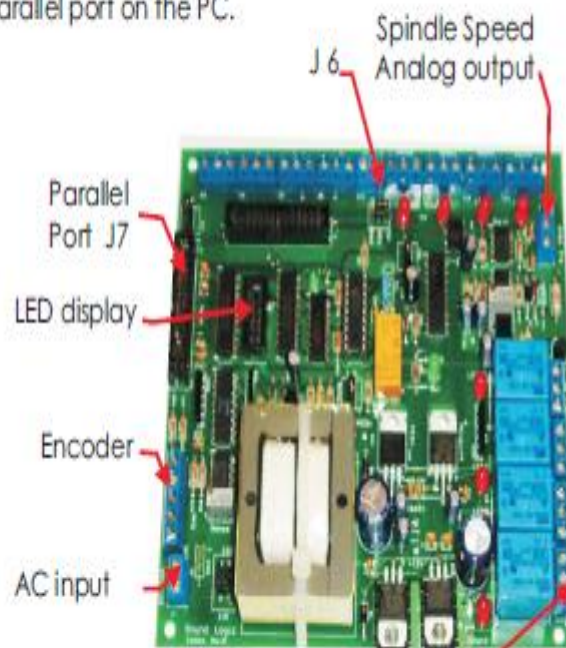
**Planos mecánicos**

**Anexo D**  
**Plano eléctrico**

## Connector Pin out.

J6 26 pin header to parallel port on the PC.

- J7 -1 Spindle step out  
 -2 X step  
 -3 Y step  
 -4 Z step  
 -5 A step  
 -6 X dir  
 -7 Y dir  
 -8 Z dir  
 -9 A dir  
 -10 Estop  
 -11 X Lim/home  
 -12 Y Lim/Home  
 -13 Z Lim/Home  
 -14 Dir out relay  
 -15 A Lim/Home  
 -16 Coolant relay  
 -17 Charge pump  
 -18 to 20 PCgnd



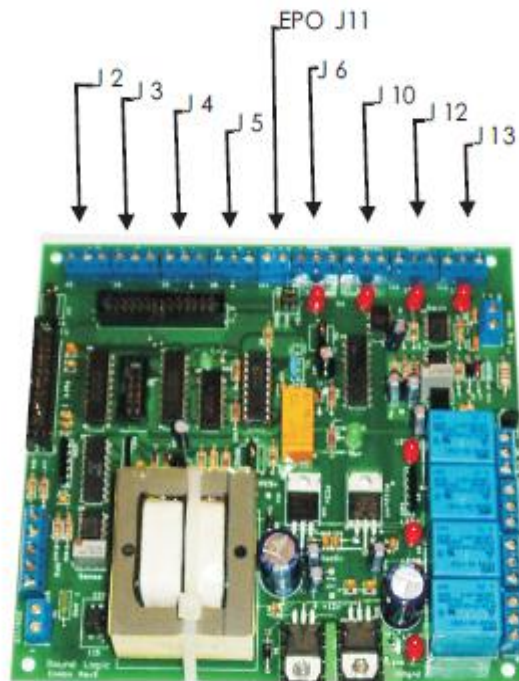
- J14 Encoder in  
 Pins 1 ground.  
 Pin 3 B to encoder  
 Pin 4 A to encoder  
 Pin 5 +5v

The +5v and ground are from the floating ground power supply on the Interface board.

J24 Power in.

J24 consists of a six pin jumper. There are two jumpers. The jumpers must be set in pairs, either between the center pins and pins 1 and 2 (115 VAC) or between the center pins and pins 5 and 6 (220 VAC).

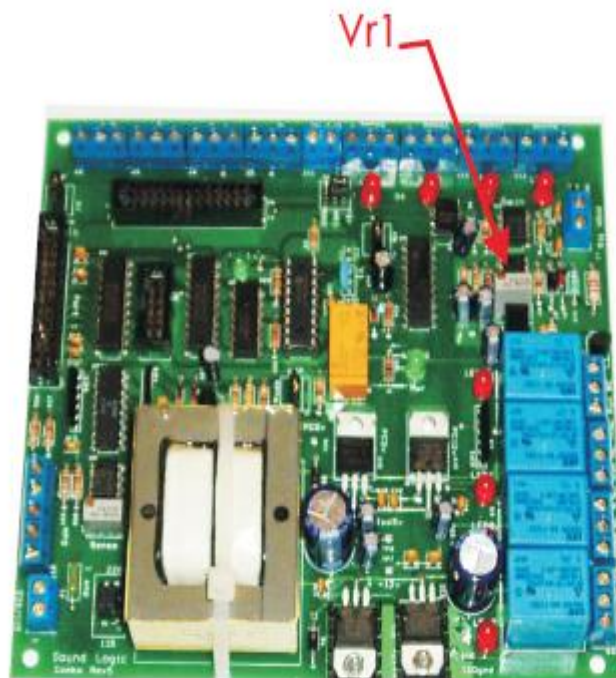
- J13 Home / Limit switch input for the A axis  
+12v is isolated and is used for powered switches such as proximity or optical switches.  
Sig Low active input  
Gnd (floating gnd)
- J12 Home / Limit switch input for the Z axis  
+12v is isolated and is used for powered switches such as proximity or optical switches.  
Sig Low active input  
Gnd (floating gnd)
- J10 Home / Limit switch input for the Y axis  
+12v is isolated and is used for powered switches such as proximity or optical switches.  
Sig Low active input  
Gnd (floating gnd)
- J6 Home limit switch input for the X axis.





### Spindle Speed Set up

The spindle speed control accepts step and direction signals from Mach3 and converts the step signals to a 0 to 5 volt or 0 to 10 volt analog ( DC ) signal for driving a VFD, or DC motor drive. Warning VFDs analog in ground is not at earth potential , in fact it is often greater than 300 volts. The spindle speed control board uses an isolated power supply and an analog optical isolator to provide the necessary safety for the installer and operators well protecting the electronics.



**About how to use:**



- 1、 To connect the PC parallel port by the parallel cable of the printer,



- 2、 The power supply input port, can set up the single or double power supply by JN1 an JN2.

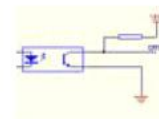


JN1&JN2 connected , is the case of the single power , the POWER + and the isolating source will be connected, the GND and the isolating source GND will be connected: if the JN1&JN2 is open circuit , the POWER + and the isolating source will be cut off, the GND and the isolating source

GND will be cut off.  J4 is the GND and the POWER + of the isolationg source: 

- 3、 Output connector, 12 wires OC( screw terminal output:

**SIGNALS OUTPUT**

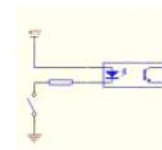
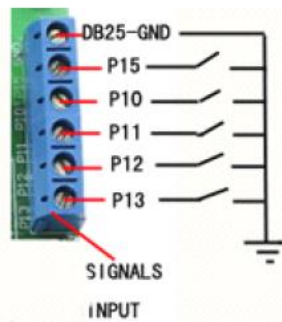
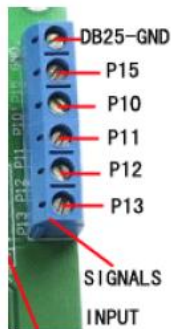


The internal circuit

J1 is the contact pin output, as the same as the terminal P2-P7, used to connect the small driver.



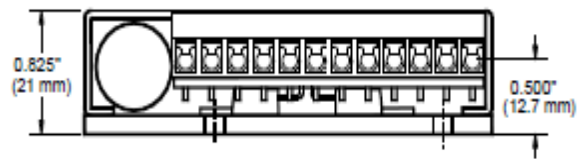
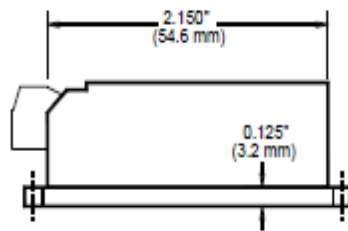
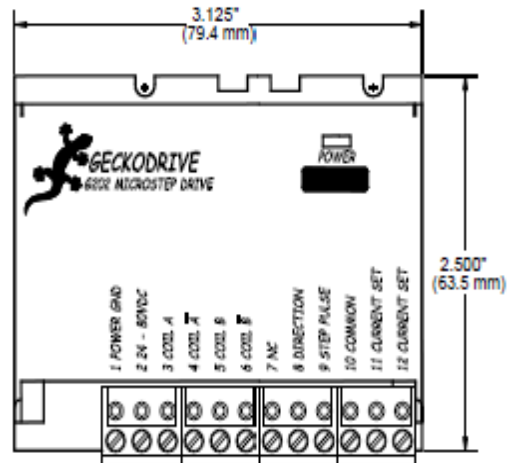
- 4、 The 5 channel input signal port can be connected to the external mechanical switch, the proximity switch etc.



Internal circuit

## G202 10 uStep Drive

Cover: Aluminum, Anodized  
 Plate: Aluminum, Hard Anodized  
 Color: Black, Yellow Text  
 Weight: 4.5 oz (130 gm)  
 Size: 3.125" X 2.5" X 0.825"  
 (79.4 X 63.5 X 21 mm)



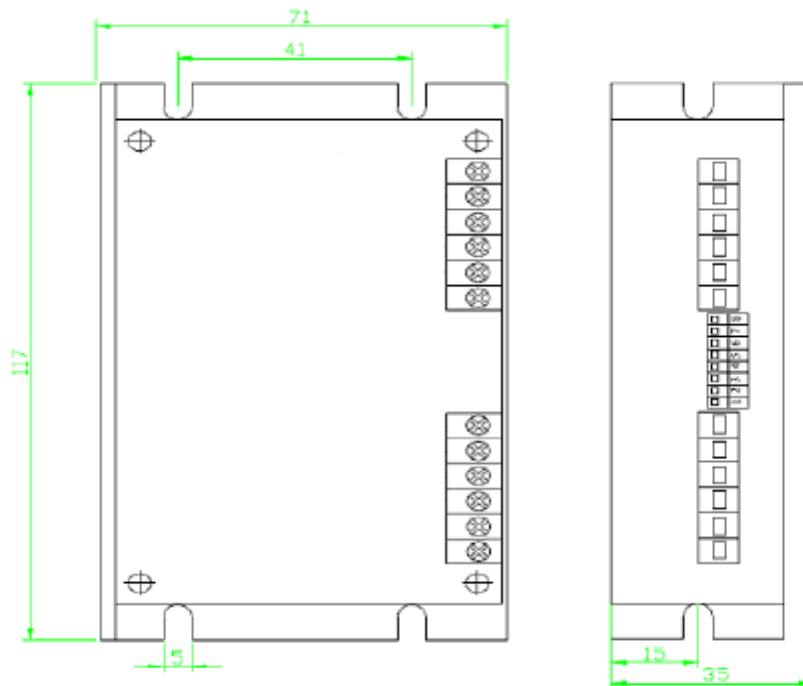
## SPECIFICATIONS:

Supply Voltage:	24 to 80 VDC
Phase Current:	1 to 7 Amps and 0.3 to 2 Amps (2 ranges)
Auto Current Reduction:	33% of set current, 1 second after last Step Pulse
Size:	3.125"W, 2.5"D, .85"H (79.4mm, 63.5mm, 21.5mm)
Mounting Pattern:	4-6-32 screws, 1.75" by 2.375" (44.5 mm, 60 mm)
Quiescent Current:	15mA or less
Weight:	4.5 oz. (130 gm)
Step Frequency:	0 to 200 kHz
Step Pulse "0" Time:	0.5uS min (Step on falling edge)
Temp:	0 to 70 C
Step Pulse "1" Time:	4.5uS min
Humidity:	0 to 95 % (non-condensing)
Direction Setup:	1uS min (20uS min hold time after Step edge)
Power Dissipation:	1 to 18 W (1 to 7 Amps)

Geckodrive Inc. Phone: 1-714-832-8874  
 14662 Franklin Ave Fax: 1-714-832-8082  
 Suite F Web Site: [www.geckodrive.com](http://www.geckodrive.com)  
 Tustin, CA 92780

**Electric Specifications ( $T_j=25^\circ\text{C}$ )**

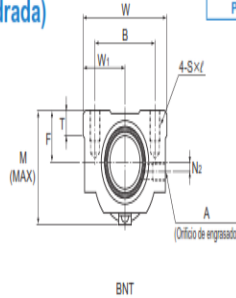
Parameters	KL4030			Unit
	Min	Typical	Max	
Output current	0.9	-	3	A
Supply voltage	20	36	40	VDC
Logic signal current	7	10	16	mA
Pulse input frequency	0	-	100	KHz
Isolation resistance	500			M $\Omega$

**Mechanical Specifications (Unit: mm, 1 inch=25.4 mm)****Features**

- Supply voltage up to +50VDC and Output current up to 4.2A
- Self-adjustment technology and Pure-sinusoidal current control technology
- Pulse input frequency up to 300 KHz
- TTL compatible and optically isolated input
- Automatic idle-current reduction
- 15 selectable resolutions, up to 25,600 steps/rev
- Suitable for 2-phase and 4-phase motors
- Support PUL/DIR and CW/CCW modes
- Short-voltage, over-voltage, over-current and over temperature protection

Husillo de bolas laminado de tipo sin precarga (tuerca cuadrada)

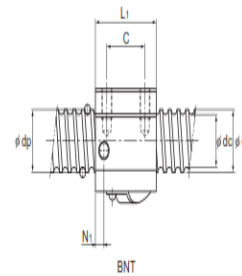
Diámetro exterior del eje del husillo	14 a 45
Paso	4 a 12



BNT

501ES

Husillo de bolas laminado



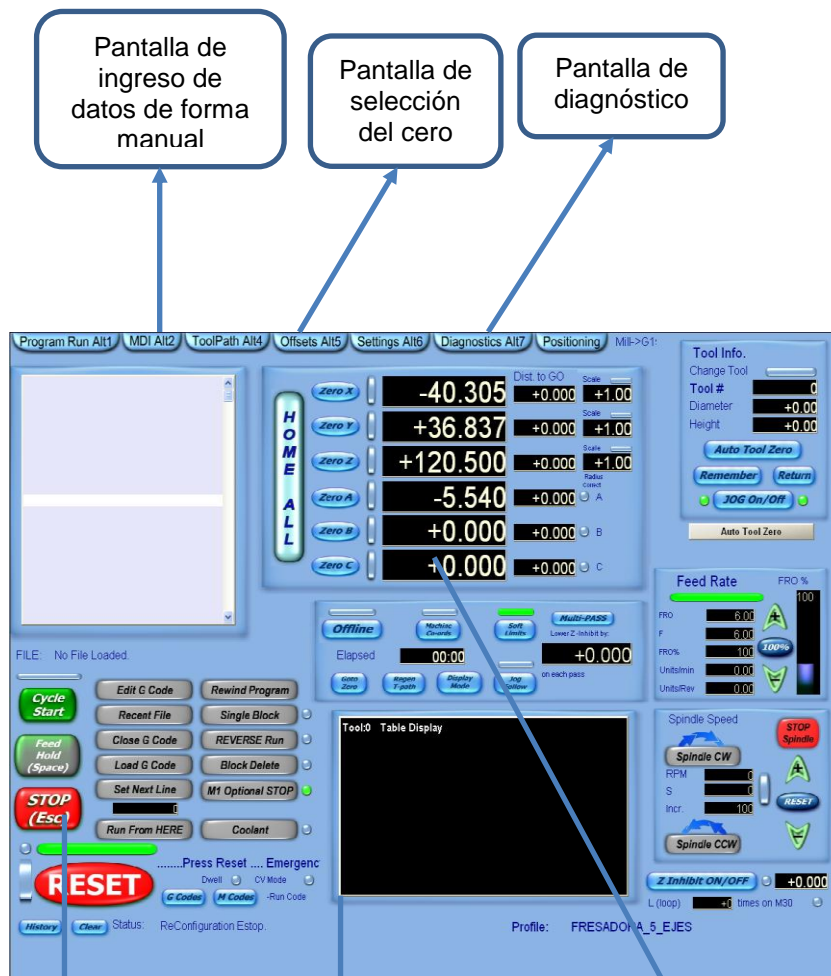
BNT

Unidad: mm

Diámetro exterior del eje del husillo d	Paso Ph	Descripción del modelo	Diámetro de bola centro a centro dp	Diámetro menor de rosca	Cantidad de circuitos cargados files x vueltas	Capacidad de carga táctica		Rigidez K N/μm	Rigidez			Dimensiones de la tuerca										Juego axial	Momento de inercia del eje del husillo mm <sup>4</sup>	Masa de la tuerca kg	Masa del eje kg/m
						Ca kN	Ca kN		Ancho W	Altura del centro F	Longitud total L	Orificio de montaje			M	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	A							
												B	C	S x/l											
14	4	BNT 1404-3,6	14,4	11,5	1x3,65	5,5	11,5	150	34	13	35	26	22	M4x7	17	6	30	6	2	M6	0,01	2,96x10 <sup>-4</sup>	0,15	1,0	
	5	BNT 1405-2,6	14,5	11,2	1x2,65	5	11,4	110	34	13	35	26	22	M4x7	17	6	31	6	2	M6	0,1	2,96x10 <sup>-4</sup>	0,15	0,99	
16	5	BNT 1605-2,6	16,75	13,5	1x2,65	5,4	13,3	130	42	16	36	32	22	M5x8	21	21,5	32,5	6	2	M6	0,01	5,05x10 <sup>-4</sup>	0,3	1,34	
18	8	BNT 1808-3,6	19,3	14,4	1x3,65	13,1	31	210	48	17	56	35	35	M6x10	24	10	44	8	3	M6	0,1	8,09x10 <sup>-4</sup>	0,47	1,71	
20	5	BNT 2005-2,6	20,5	17,2	1x2,65	6	16,5	150	48	17	35	35	22	M6x10	24	9	39	5	3	M6	0,01	1,23x10 <sup>-3</sup>	0,28	2,15	
	10	BNT 2010-2,6	21,25	16,4	1x2,65	10,6	25,1	160	48	18	58	35	35	M6x10	24	9	46	10	2	M6	0,1	1,23x10 <sup>-3</sup>	0,5	2,16	
25	5	BNT 2505-2,6	25,5	22,2	1x2,65	6,7	20,8	180	60	20	35	40	22	M8x12	30	9,5	45	7	5	M6	0,01	3,01x10 <sup>-3</sup>	0,41	3,45	
	10	BNT 2510-5,3	26,8	20,2	2x2,65	31,2	83,7	400	60	23	94	40	60	M8x12	30	10	55	10	—	M6	0,1	3,01x10 <sup>-3</sup>	1,18	3,26	
28	6	BNT 2806-2,6	28,5	25,2	1x2,65	7	23,4	200	60	22	42	40	18	M8x12	30	10	50	8	—	M6	0,01	4,74x10 <sup>-3</sup>	0,81	4,44	
	6	BNT 2806-5,3	28,5	25,2	2x2,65	12,8	46,8	390	60	22	67	40	40	M8x12	30	10	50	8	—	M6	0,1	4,74x10 <sup>-3</sup>	0,78	4,44	
32	10	BNT 3210-2,6	33,75	27,2	1x2,65	19,8	53,8	250	70	26	64	50	45	M8x12	35	12	62	10	—	M6	0,14	8,08x10 <sup>-3</sup>	1,3	5,49	
	10	BNT 3210-5,3	33,75	27,2	2x2,65	36	107,5	490	70	26	94	50	60	M8x12	35	12	62	10	—	M6	0,14	8,08x10 <sup>-3</sup>	2,0	5,49	
36	10	BNT 3610-2,6	37	30,5	1x2,65	20,8	59,3	270	86	29	64	60	45	M10x16	43	17	67	11	—	M6	0,17	1,29x10 <sup>-2</sup>	1,8	6,91	
	10	BNT 3610-5,3	37	30,5	2x2,65	37,8	116,7	530	86	29	96	60	60	M10x16	43	17	67	11	—	M6	0,17	1,29x10 <sup>-2</sup>	2,4	6,91	
45	12	BNT 4512-5,3	46,5	39,2	2x2,65	49,5	169	650	100	36	115	75	75	M12x20	50	20,5	80	13	—	M6	0,2	3,16x10 <sup>-2</sup>	4,1	11,08	

**Anexo J**

**Manual de operación**



Pantalla de ingreso de datos de forma manual

Pantalla de selección del cero

Pantalla de diagnóstico

Paro de emergencia

Pantalla de visualización de la herramienta

Pantalla de visualización del recorrido de los ejes