



La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

***Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.***

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **IMPLEMENTACIÓN DE UN CENTRO DE MECANIZADO CON TRES GRADOS DE LIBERTAD, PARA GRABADO O CORTE EN MATERIALES RÍGIDOS**

#### **PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**BRAZALES ESPINOZA WILLIAM DANIEL**

**danywill05@hotmail.com**

**DIRECTOR: ING. GERMÁN CASTRO MACANCELA MSc.**

**gcastro@gammaservicios.com.ec**

**Quito, Mayo 2013**

## **DECLARACIÓN**

Yo **William Daniel Brazales Espinoza**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**William Daniel Brazales Espinoza**

**171962298-5**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por William Daniel Brazales Espinoza, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Germán Castro Macancela MSc.**

**DIRECTOR DEL PROYECTO**



## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por darme la salud y fuerza, por permitirme disfrutar de cada instante de mi vida junto a mis seres queridos.

A mi familia, por siempre confiar en mí, por su apoyo incondicional, su cariño y amor nunca terminare de agradecer todo lo que han hecho por mí, gracias de todo corazón.

A mi novia, Mayra por todo su apoyo.

A mis compañeros, amigos y profesores por compartir sus conocimientos y habilidades, por encender la antorcha que ilumina el camino del conocimiento.

A todo el equipo de Gamma Servicios Electrónicos, en especial al Ing. Germán Castro, quienes confiaron en mí para el desarrollo del presente proyecto.

***Daniel***

## DEDICATORIA

Para Isaías mi Padre, María mi Madre, Pablo y Gabriel mis Hermanos, a quienes debo todo, pero sobre todo mi admiración, respeto, gratitud y cariño. Para todos ellos y a mí mismo va dedicado el presente trabajo, fruto de un esfuerzo en conjunto.

***Daniel***

## CONTENIDO

**PRESENTACIÓN.....VIII**

**RESUMEN.....IX**

## CAPÍTULO I

### COMPONENTES DEL SISTEMA

	<b>Pg.</b>
1.1	INTRODUCCIÓN ..... 1
1.2	DESARROLLO HISTÓRICO DEL CONTROL NUMÉRICO “CNC” .....2
1.3	DEFINICIÓN CNC.....4
1.4	CARACTERÍSTICAS DE UNA MÁQUINA CNC .....5
1.4.1	VENTAJAS ..... 5
1.4.2	DESVENTAJAS..... 5
1.4.3	FACTOR HUMANO ..... 6
1.5	CLASIFICACIÓN DEL LOS SISTEMAS CNC.....6
1.5.1	CLASIFICACIÓN SEGÚN EL TIPO DE POSICIONAMIENTO ..... 6
1.5.1.1	Control punto a punto ..... 6
1.5.1.2	Control paraxial ..... 7
1.5.1.3	Control de contorneados ..... 7
1.5.2	CLASIFICACIÓN POR EL TIPO DE LAZO DE CONTROL..... 8
1.5.2.1	Sistema en lazo abierto ..... 8
1.5.2.2	Sistema en lazo cerrado..... 8
1.6	HARDWARE Y SOFTWARE DE UN SISTEMA CNC .....9
1.6.1	SISTEMA DE COORDENADAS DE LOS EJES DE MOVIMIENTO ..... 9
1.6.1.1	Eje X..... 10
1.6.1.2	Eje Y ..... 10
1.6.1.3	Eje Z..... 10
1.6.2	DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO ..... 11
1.6.2.1	Estructura principal..... 11
1.6.2.2	Mesa de trabajo..... 13

	<b>Pg.</b>
1.6.2.3	Sistemas de guías..... 14
1.6.2.4	Sistema de transmisión de movimiento..... 15
1.6.2.5	Tornillo de bolas re-circulantes..... 16
1.6.2.5.1	Repetitividad y exactitud..... 16
1.6.2.5.2	Backlash..... 16
1.6.2.5.3	Lubricación del sistema de transmisión de movimiento..... 17
1.6.3	DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES PARA EL SISTEMA DE MOVIMIENTO DEL EJE Z ..... 19
1.6.4	DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES PARA EL SISTEMA DE MOVIMIENTO DEL EJE Y ..... 24
1.6.5	DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES PARA EL SISTEMA DE MOVIMIENTO DEL EJE X ..... 29
1.6.6	ACOPLES MECÁNICOS ENTRE LOS TORNILLOS DE BOLAS RECIRCULANTES Y LOS MOTORES A PASOS ..... 33
1.6.6.1	Resonancia ..... 33
1.6.6.2	Compensadores de los efectos de la resonancia..... 34
1.7	IMPLEMENTACIÓN Y COMPONENTES DEL SISTEMA MECÁNICO..35

## **CAPÍTULO II**

### **ENLACE DE LOS SISTEMAS CAD – CAM – CNC**

2.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MECANIZADO.....42
2.1.1	MODELO DE OPERACIÓN FUNCIONAL..... 43
2.1.1.1	Propósito ..... 43
2.1.1.2	Metas y objetivos..... 43
2.1.1.2.1	Archivo vectorizado ..... 43
2.1.1.2.2	Instrucciones en código G ..... 43
2.1.1.2.3	Señales de control..... 44
2.1.1.2.4	Mecanizado ..... 44
2.1.1.3	Funciones..... 44

	<b>Pg.</b>
2.1.1.4	Componentes.....44
2.2	SISTEMAS CAD – CAM .....45
2.2.1	DESARROLLO DEL CAD- CAM .....45
2.2.2	APLICACIONES DE LOS SISTEMAS CAD, CAM.....45
2.3	TÉCNICAS DE PROGRAMACIÓN CNC .....48
2.3.1	PROGRAMACIÓN MANUAL .....48
2.3.2	PROGRAMACIÓN CONVERSACIONAL.....48
2.3.3	PROGRAMACIÓN USANDO SISTEMAS DE CAD/CAM .....49
2.4	CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS CAD/CAM.....50
2.5	SOFTWARE CAD/CAM.....50
2.6	POST PROCESADORES .....51
2.7	EXTRUCTURA DE UN PROGRAMA CNC .....51
2.7.1	RESUMEN LENGUAJE RS274 / NGC.....52
2.7.1.1	Formato de una línea .....52
2.7.1.2	Número de línea.....52
2.7.1.4	Número .....53
2.7.1.5	Parámetros .....53
2.7.1.6	Expresiones y operaciones binarias .....53
2.7.1.7	Comentarios y mensajes.....53
2.7.1.8	Modales ..... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.7.2	CÓDIGO G .....54
2.7.2.1	G00 - POSICIONAMIENTO RÁPIDO .....54
2.7.2.2	G01 - Interpolación lineal .....54
2.7.2.3	G02 Interpolación helicoidal (CW) y G03 Interpolación helicoidal (CCW).....55
2.7.2.4	G04 – Pausa .....55
2.7.2.5	G10 L9 – Configuración de parámetros sin movimiento .....55
2.7.2.6	Códigos M.....55
2.7.2.7	Otros códigos .....56
2.7.2.8	Ejemplos .....56
2.7.2.8.1	Mecanizado de un cuadrado, lado de 150mm y profundidad de 3mm.....56
2.7.2.8.2	Mecanizado circunferencia de radio = 150mm profundidad de 3mm.....58
2.8	PROCESO DE VECTORIZACIÓN Y GENERACIÓN DE CÓDIGO G MEDIANTE CORELDRAWYCNCUSB CONTROLLER ..... 59
2.8.1	PROCESO DE VECTORIZACIÓN MEDIANTE CORELDRAW .....59

	<b>Pg.</b>
2.8.1.1 Descripción de CorelDraw .....	59
2.8.1.2 Ventanas y herramientas.....	60
2.8.1.2.1 Barra estándar.....	61
2.8.1.2.2 Barra de herramientas.....	61
2.8.1.2.3 Paleta de colores.....	61
2.8.1.2.4 Barra acoplable .....	62
2.8.1.2.5 Control de páginas .....	62
2.8.1.2.6 Barra de estado .....	62
2.8.1.2.7 Barra de propiedades .....	62
2.8.1.2.8 Pagina de dibujo.....	62
2.8.1.3 Ejemplo de vectorización de una imagen JPEG.....	62
2.8.2 EXPORTAR UNA ARCHIVO COMO PLT .....	65
2.8.3 IMPORTAR UN ARCHIVO PARA GENERAR EL CODIGO G.....	66

## **CAPÍTULO III**

### **DISEÑO SISTEMA DE CONTROL**

3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO .....	68
3.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA ELECTRÓNICO .....	68
3.2 DISEÑO Y SELECCIÓN DE MOTORES PARA LOS EJES X, Y, Z.....	70
3.2.1 SELECCIÓN DE MOTORES PASO A PASO (PAP) .....	70
3.2.1.1 Ventajas de los motores PAP .....	70
3.2.1.2 Desventajas de los motores PAP .....	71
3.2.1.3 Clases de motores PAP .....	71
3.2.1.3.1 PAP Híbridos.....	71
3.2.1.3.2 PAP Híbridos de dos fases.....	73
3.2.1.3.3 Características de operación de un motor PAP híbrido.....	74
3.2.2 FACTORES DE SELECCIÓN DE UN PAP .....	75
3.2.2.1 PAP hibrido vs reluctancia variable vs imán permanente.....	75
3.2.2.2 Híbridos vs. Imán Permanente .....	75

	<b>Pg.</b>
3.2.2.3	Unipolares vs. Bipolares..... 75
3.2.3	SELECCIÓN LOS MOTORES PASO A PASO DEL SISTEMA CNC.... 75
3.3	SELECCIÓN SISTEMA DE CONTROL DE LOS PAP HÍBRIDOS.....78
3.3.1	CONTROL POR MICROPASOS (MICROSTEPPING) ..... 79
3.3.1.1	Principios de funcionamiento del control por micropasos..... 79
3.3.2	DIAGRAMAS FASORIALES EN LOS MOTORES CONTROLADOS POR MICROPASOS ..... 82
3.3.3	DRIVERS MICROSTEPPING SELECCIONADOS ..... 84
3.3.3.1	Selección de drivers para el eje Z y eje Y ..... 84
3.3.3.2	Selección driver eje X..... 87
3.4	FUENTE DE ALIMENTACIÓN AC/DC.....89
3.4.1	TIPOS DE FUENTES DE ALIMENTACIÓN AC/DC ..... 89
3.4.1.1	Fuentes de alimentación no reguladas..... 90
3.4.1.2	Fuentes de alimentación reguladas linealmente ..... 90
3.4.1.3	Fuentes de alimentación conmutadas..... 91
3.4.1.3.1	Características de una fuente de alimentación conmutadas ..... 93
3.4.2	SELECCIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN ..... 94
3.4.2.1	Voltaje de salida necesario..... 94
3.4.2.2	Corriente requerida..... 94
3.5	CONTROLADORA CNC .....95
3.5.1	TIPOS DE CONTROLADORAS CNC ..... 96
3.5.1.1	Controladoras integradas ..... 96
3.5.1.2	Controladoras Modulares ..... 96
3.5.2	SELECCIÓN DE LA TARJETA DE CONTROL CNC ..... 97
3.5.3	CARACTERÍSTICAS DE LA CONTROLADORA CNC ..... 98
3.6	INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE MOVIMIENTO Y CONTROL .....99
3.6.1	INTEGRACIÓN CONTROLADORA – DRIVERS ..... 99
3.6.1.1	Configuración de parámetros driver – controladora eje X ..... 100
3.6.1.2	Configuración de parámetros driver – controladora ejes Y, Z ..... 102
3.6.2	CONEXIÓN DRIVERS – MOTORES PAP - FUENTE DE ALIMENTACIÓN..... 104
3.6.3	SENSORES DE POSICIÓN DEL SISTEMA..... 105

	<b>Pg.</b>
3.6.3.1 Montaje de los finales de carrera .....	106
3.6.3.2 Conexión de los finales de carrera .....	107
3.6.3.3 Posición inicial .....	108
3.6.3.4 Panel de control .....	110
3.6.4 CONTROL DE POSICIÓN MANUAL.....	111
3.6.4.1 Control de proceso de mecanizado mediante el panel de control .....	113
3.6.5 CONTROL DE ENCENDIDO Y APAGADO DEL SPINDLE .....	117
3.6.6 CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN .....	119
3.6.6.1 Disyuntor principal .....	119
3.6.7 TRATAMIENTO DE INTERFERENCIAS .....	120
3.6.7.1 Filtros Bypass.....	121
3.6.7.2 Cableado .....	122
3.6.8 TABLERO DE CONTROL ELÉCTRICO .....	122
3.6.9 CADENA PORTA CABLES .....	123
3.7 HERRAMIENTA DE MECANIZADO O SPINDLE .....	123
3.8 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO .....	125
3.9 HMI INTEGRACIÓN CAD- CAM – CNC.....	129
3.9.1 PRESENTACIÓN.....	130
3.9.2 INICIO DE APLICACIÓN.....	130
3.9.3 AUTENTIFICACIÓN DE USUARIO.....	131
3.9.4 DATOS DEL PROYECTO .....	131
3.9.5 VENTANA DE PROGRAMAS CNC.....	132

## **CAPÍTULO IV**

### **PRUEBAS Y RESULTADOS**

4.1 PRIMEROS RESULTADOS .....	133
4.2 RESULTADOS FINALES .....	134
4.2.1 CORTE SOBRE MDF Y ACRÍLICO.....	134
4.2.2 GRABADO .....	136



4.3	CENTRO DE MECANIZADO IMPLEMENTADO.....	136
4.3.1	CARACTERÍSTICAS.....	144
4.3.2	REQUERIMIENTOS.....	145
4.3.3	COSTO DE IMPLEMENTACIÓN.....	146

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1	CONCLUSIONES .....	149
5.2	RECOMENDACIONES .....	150

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>152</b>
---	------------

<b>ANEXO A MANUAL DE USUARIO.....</b>	<b>AI</b>
---------------------------------------	-----------

<b>ANEXO B DIAGRAMAS Y ESQUEMAS.....</b>	<b>BI</b>
--	-----------

<b>ANEXO C HOJAS DE DATOS Y CARACTERÍSTICAS.....</b>	<b>CI</b>
--	-----------

## **PRESENTACIÓN**

El presente proyecto de titulación tiene como objetivo grabar o cortar en dos y tres dimensiones material rígido como acrílico o madera. Para lo cual se acciona y guía la herramienta llamada spindle por una ruta preestablecida en un programa CAD – CAM con el fin de transformar la materia prima en un producto de valor agregado.

El centro de mecanizado CNC es el resultado de la combinación electrónica - mecánica integradas como una sola herramienta. Para su implementación las ramas del conocimiento necesarias son: Física, Instrumentación electrónica, Electrónica de potencia, Conversores de potencia, Control de procesos, Control Industrial, Interfaces de comunicación y Formulación de proyectos.

El sistema mecánico guía y convierte el movimiento circular de los motores en desplazamientos lineales, las características principales que posee este sistema son: baja fricción, reducción de vibración y juego mecánico nulo.

El sistema electrónico acciona los elementos finales de control (motores paso a paso y spindle) siguiendo un código numérico de instrucciones generado por software CAD – CAM. Además cuentan con sensores de posición, botones para el movimiento manual, controles de velocidad y pulsadores de emergencia que garantizan la eficiencia y seguridad.

El resultado obtenido es una máquina CNC confiable y ampliamente aceptada por los usuarios debido a su compatibilidad con la tecnología actual de diseño y maquinado.

## **RESUMEN**

El capítulo 1 introduce a los sistemas CNC, indicando su desarrollo, características, clasificación y requerimientos. Una vez identificados todos sus componentes se procede con el diseño del sistema mecánico tomando en cuenta los efectos de las fuerzas que actúan en el proceso de mecanizado, dimensionando y eligiendo los elementos que garanticen condiciones de exactitud y precisión.

El capítulo 2 describe el software CAD – CAM – CNC identificando su interacción, la función y lenguaje de cada etapa, se estudia el código G generado bajo la norma RS274, su comprensión permite detectar posibles errores en la ejecución o compatibilidad entre distintos programas. Se desarrollan dos ejemplos de vectorización y generación de código G usando un software comercial y el post procesador de la controladora implementada en el presente proyecto.

El diseño del sistema electrónico de control se desarrolla en el Capítulo 3, caracterizando al sistema e identificando sus requerimientos, con base a lo descrito en los capítulos anteriores se analiza elemento por elemento comparándolos con los distintos tipos existentes en el mercado, demostrando el porqué se selecciono cada uno de ellos. Finalmente se integra como un solo sistema, se añade protecciones y componentes necesarios para su correcto funcionamiento.

El capítulo 4 muestra el resultado obtenido al implementar el presente proyecto, comprobando de esta manera el cumplimiento de los objetivos planteados.

Las conclusiones y recomendaciones se las desarrolla en el capítulo 5.

Finalmente se presentan como anexos diagramas y esquemas mecánicos – electrónicos, manual de usuario y hojas de características de los componentes del sistema.

# CAPÍTULO I

## COMPONENTES DEL SISTEMA

### 1.1 INTRODUCCIÓN

Un sistema de mecanizado usando la técnica de Control Numérico Computarizado o CNC, consiste en el diseño, planificación y maquinación de piezas mediante el uso de software y hardware integrados como una sola herramienta de soporte y aplicación, desarrollada principalmente para procesos industriales cuyo objetivo es mejorar la calidad del producto, reducir los tiempos de diseño y elaboración.

La implementación y aplicación de un sistema CNC en procesos productivos se denomina “Fabricación Integrada por Computador” o “Gestión Integrada por Computador” cuyo objetivo es llevar al máximo nivel de automatización el proceso sobre el cual es ejecutado [1].

Buscar el mejoramiento continuo de un proceso de producción es imprescindible para ser competitivo local e internacionalmente en el mercado, cuyas características son:

- Los consumidores exigen cada vez mayor precisión en los productos, se buscan acabados más finos y detallados.
- La forma y diseño de los productos evolucionan día a día, a fin de captar la atención de los consumidores, cada vez son más complejos e innovadores aumentando el grado de dificultad fabricarlos.
- La diversificación de las industrias hace necesario la tendencia a estructuras de producción más flexibles que se adapten a los cambios del mercado al menor costo posible, se tiende a ofrecer más de un producto o servicio.
- El tiempo de entrega de los productos tiende a ser cada vez más reducido, los consumidores tienen necesidades inmediatas.

## 1.2 DESARROLLO HISTÓRICO DEL CONTROL NUMÉRICO “CNC” [2]

El control numérico computarizado o “CNC”, tiene su origen al buscar una herramienta capaz de mecanizar con precisión y una buena repetitividad figuras geométricamente complejas.

La primera vez que se uso el control numérico fue en el siglo XIX, en un telar semi-automático desarrollado por Jacquard. La selección del tejido a confeccionarse se realizaba por medio de tarjetas perforadas, las cuales contenían instrucciones para ir situando los hilos de forma automática.

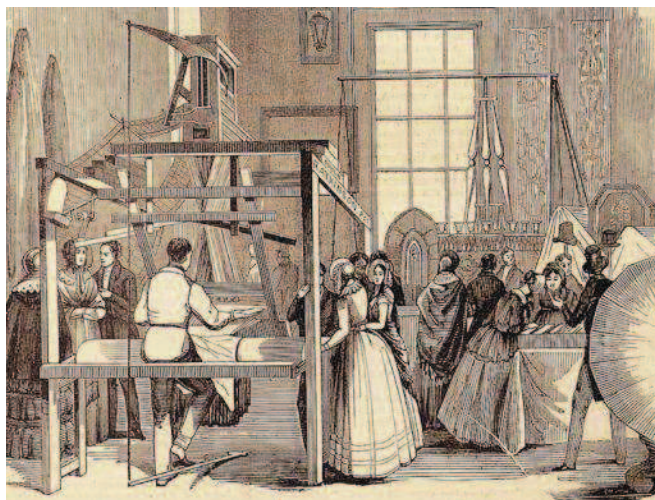


Figura 1.1 Máquina de tejer de Atkinson, tomado de [3].

En 1942 la corporación Bendix debía fabricar una leva tridimensional con detalles y requerimientos prácticamente imposibles de realizar con precisión usando máquinas comandadas manualmente. Para dar solución a este requerimiento se definió el número de puntos que conformaban la trayectoria a seguir por la herramienta de mecanizado, mediante un sistema de coordenadas.

Jhon Parsons en 1947 desarrolla el mando automático conocido como Digitón, para construir hélices de helicópteros, la información con las señales de control se guardaba en tarjetas perforadas que un lector debía traducirlas a señales de mando a los dos ejes de movimiento.

El instituto de Tecnología de Massachusetts o “MIT” en 1953 denomina a esta técnica como "Numerical Control" o sus siglas CN.

Para 1956 la aplicación se desarrollo y probó en máquinas CN, con fines militares en Estados Unidos existiendo más de una empresa encargada del desarrollo de la nueva tecnología.

Debido al amplio campo de aplicación varias compañías comenzaron con el desarrollo de máquinas de uno o dos ejes con posicionamiento preciso, encargadas de funciones como taladrado, mandrilado y punteado.

En 1960 el MIT desarrollo el Control Adaptable que puede definirse como Control Numérico Auto regulable. En 1968 tuvieron lugar los primeros ensayos de Control Numérico Directo (DNC).

En 1970 al control NC se agrega el microcomputador y perfecciona hasta llegar a ser CNC totalmente controlado por un computador. Después de 1972 las máquinas CNC han venido evolucionado a la par con los computadores haciéndolas más confiables y fáciles de manejar [4].

En la actualidad los sistemas CNC no solo dependen del desarrollo del hardware electrónico, sino que va de la mano con el desarrollo del software de diseño, modelado y simulación.

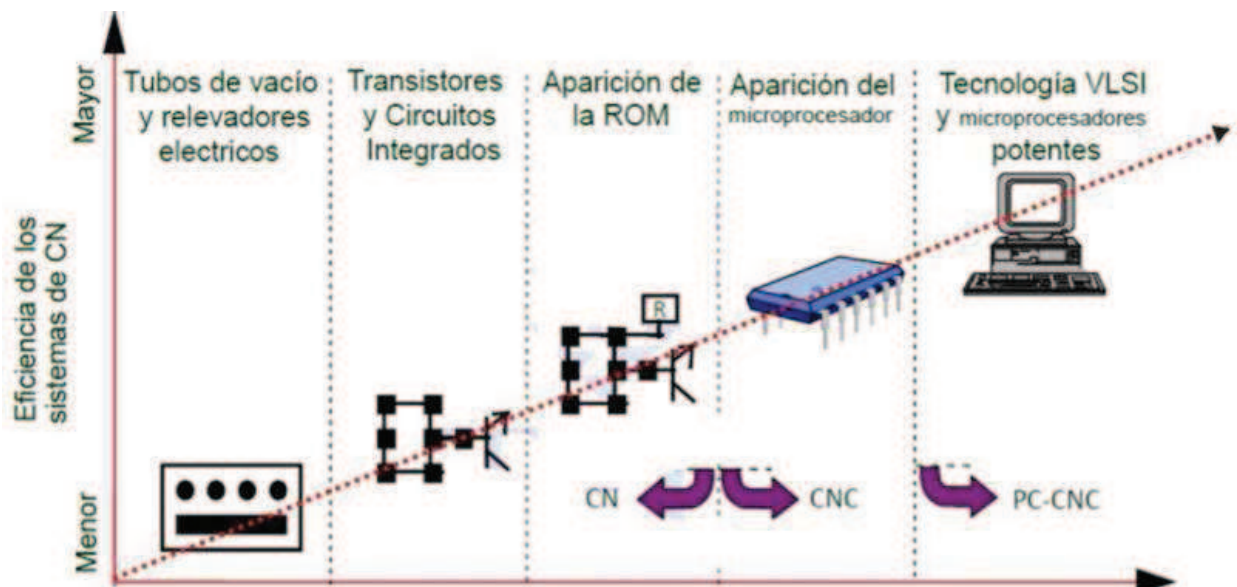


Figura 1.2 Eficiencia de los Sistemas CN, tomado de [5].

### 1.3 DEFINICIÓN CNC

CNC es el acrónimo de “Computer Numerical Control” o “Control Numérico Computacional”. Es considerado como sistema CNC a todo dispositivo capaz de posicionar un punto móvil siguiendo un código de instrucciones, las cuales son generadas por el software de control.

De manera genérica el control numérico es un sistema de automatización que controla el funcionamiento del hardware mediante instrucciones ingresadas por software.

Una cualidad importante es la fácil adaptación a los cambios, no está restringido a un solo modelo o producto, las modificaciones se realiza vía software, variando el programa de ejecución, mientras que el hardware tiene poca o ninguna transformación.

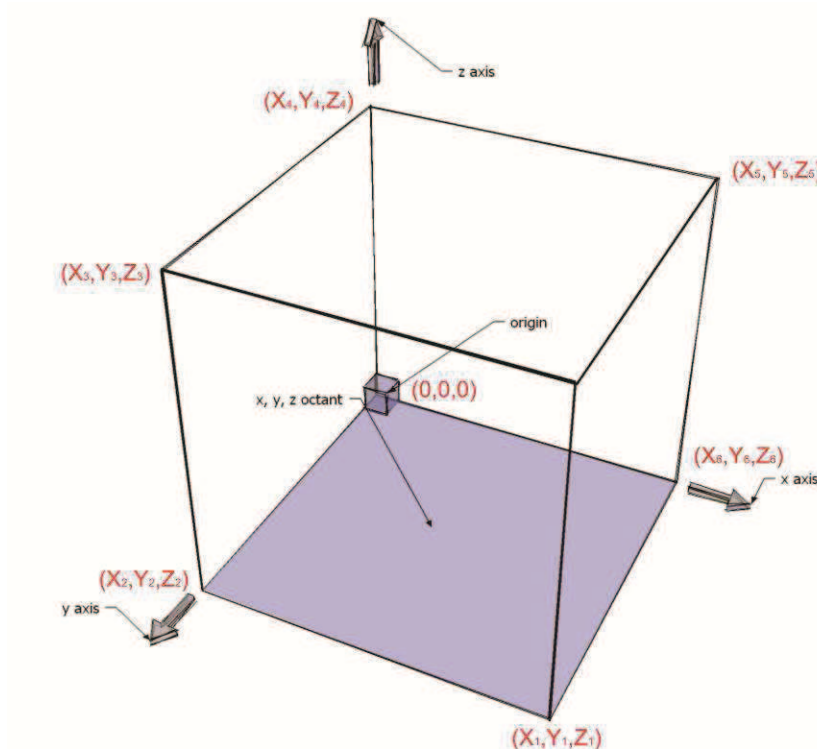


Figura 1.3 Sistema de coordenadas.

La Figura 1.3 representa un cubo en el sistema de coordenadas cartesianas X, Y, Z, por ejemplo para alcanzar cada arista se debe ingresar la posición de estos puntos al software de control, el cual envía información a los actuadores para que recorran dicha trayectoria.

Además de la información de posición se ingresa parámetros de control de proceso, como lo son: la velocidad, tipo de herramienta, mecanismo de refrigeración, aspirado, posición de origen, entre los datos más importantes.

## **1.4 CARACTERÍSTICAS DE UNA MÁQUINA CNC [6]**

### **1.4.1 VENTAJAS**

- Productos elaborados con acabados más finos, aumentando la calidad.
- Excelente repetitividad, depurado el programa de mecanizado se puede asegurar que todos los productos elaborados bajo el mismo código serán iguales.
- Debido al grado de automatización no se requiere presencia continua por parte del operador.
- No existe limitación en cuanto a formas geométricas, una vez realizado el programa, la máquina ejecuta cada una de las instrucciones, por lo que no hay limitación en el maquinado.
- Adaptabilidad ante cambios en el diseño, forma, tamaño o material sobre el cual se realiza el mecanizado.
- Reducción de los costos de inventario y desechos.
- Tiempos de ejecución reducidos, aumentando el nivel de producción, por lo que puede satisfacer a un sector más amplio del mercado.
- Reducción de los factores de riesgo laboral.
- Control y monitoreo de tiempos de ejecución lo que permite cumplir con programas de producción.

### **1.4.2 DESVENTAJAS**

- Inversión inicial alta, requiere de grandes volúmenes de producción que justifiquen la adquisición de un sistema CNC.
- Dependencia total de una sola máquina.
- Mantenimientos costosos, repuestos y accesorios difíciles de adquirir.



### 1.4.3 FACTOR HUMANO

La operación de una maquinación CNC requiere de personal especializado con habilidades y conocimientos en:

- Trigonometría, Álgebra, Física, Metrología.
- Diseño e interpretación de planos en 2d y 3d.
- Resistencia de materiales.
- Métodos de moldeado y maquinado.
- Programación CNC.

## 1.5 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS CNC [7]

### 1.5.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL TIPO DE POSICIONAMIENTO

#### 1.5.1.1 Control punto a punto

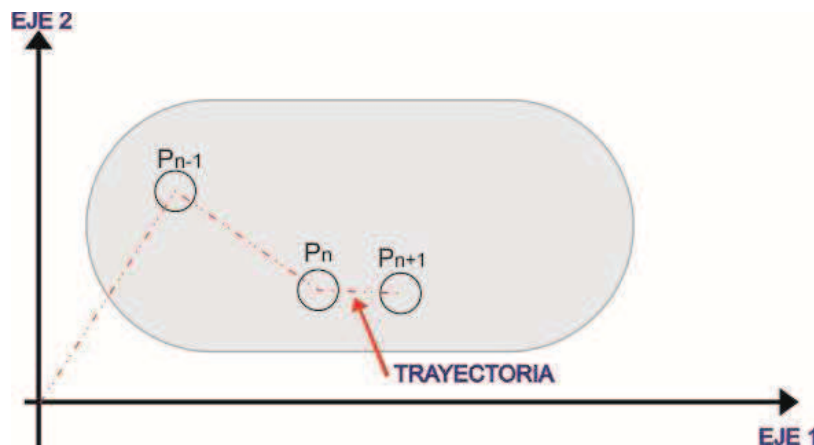


Figura 1.4 Control punto a punto.

El control de posición de la herramienta se realiza punto a punto, se busca alcanzar uno de ellos en el menor tiempo posible sin importar la trayectoria que deba seguir, desde el punto anterior hasta el siguiente.

La trayectoria a seguir no es importante ya que el mecanizado solo se realiza en el punto, mas no en el camino recorrido.

Este tipo de control es aplicado especialmente en soldadoras de punto, punzadoras, marcadoras, remachadoras y taladradoras.

### 1.5.1.2 Control paraxial

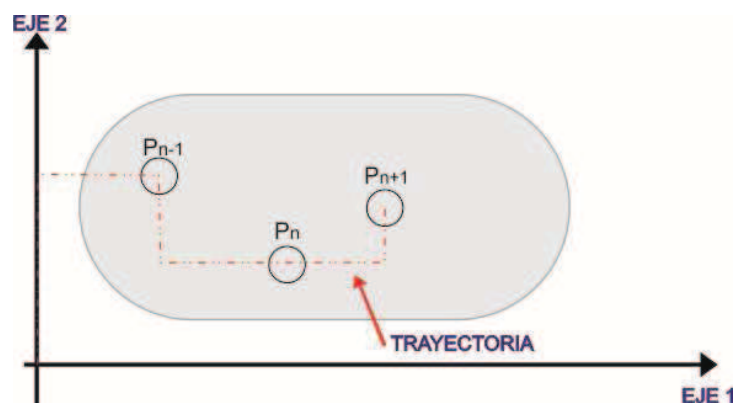


Figura 1.5 Control paraxial.

Controla la posición de la herramienta y además la trayectoria la cual es siempre paralela a los ejes de movimiento lo cual es una limitación, por lo que no es muy utilizado.

El traslado desde el punto  $P_n$  al punto  $P_{n+1}$  sigue una trayectoria paralela al eje 1 y luego paralela al eje 2 como muestra la Figura 1.5.

### 1.5.1.3 Control de contorneados

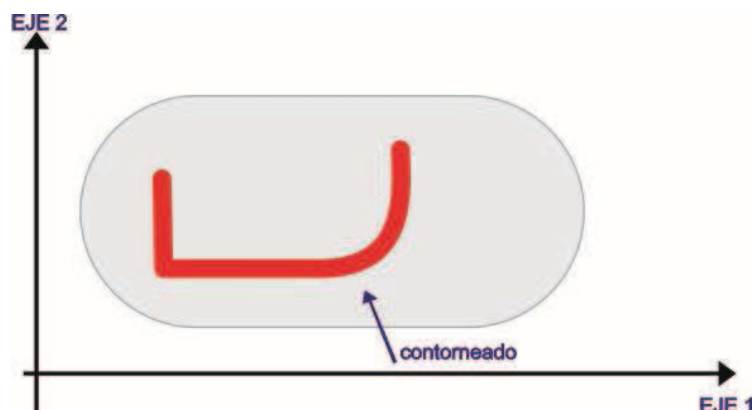


Figura 1.6 Control de contorneados.

La mecanización se realiza por toda la trayectoria del cuerpo de trabajo, tomando cualquier dirección, rectas o curvas. Su programación debe ser depurada especialmente en las curvas las cuales son aproximaciones a rectas. Cuando existe más de una trayectoria, se mecaniza la primera luego se produce un salto hasta ubicarse en el inicio de la siguiente y comenzar el mecanizado.

## 1.5.2 CLASIFICACIÓN POR EL TIPO DE LAZO DE CONTROL

### 1.5.2.1 Sistema en lazo abierto

El sistema en lazo abierto envía información de la trayectoria a seguir por la herramienta de mecanizado y no se recibe confirmación que indique que las instrucciones se están cumpliendo, es decir no existe realimentación.



Figura 1.7 Control en lazo abierto.

Como se aprecia en la Figura 1.7, la salida no influye en la entrada, por lo que las acciones de control no dependen del comportamiento del actuador.

### 1.5.2.2 Sistema en lazo cerrado

Este sistema envía señales con información correspondiente a la trayectoria y velocidad a seguir por la herramienta de mecanizado, se miden estos parámetros en los actuadores y se los realimenta hacia la etapa de control el cual ejerce la acción correctiva en caso de existir un error.

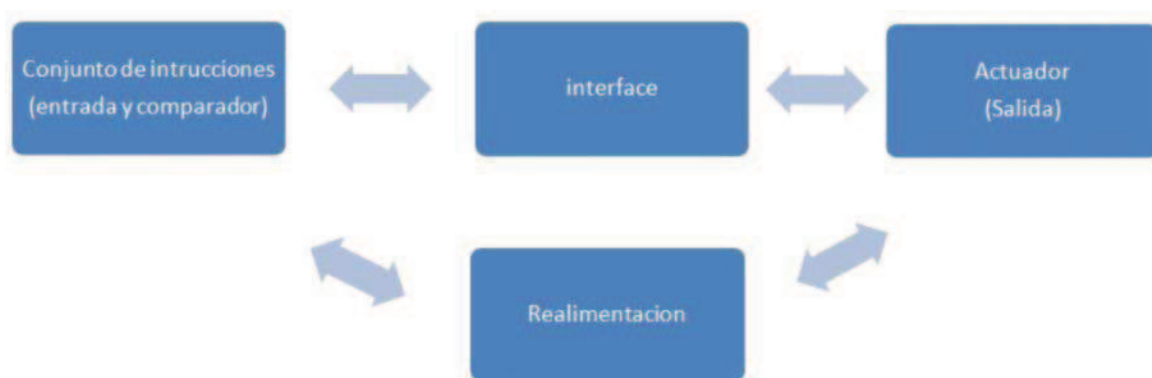


Figura 1.8 Control en lazo cerrado.

El sistema en lazo cerrado corrige la salida, asegurando de esta forma que las instrucciones de entrada se cumplen, es decir no existe una pérdida de información, generalmente cuando la máquina CNC tiene una inercia alta con grandes aceleraciones y desaceleraciones pueden aparecer oscilaciones lo cual debe ser corregido por el controlador, generalmente se usa un PID [8].

## 1.6 HARDWARE Y SOFTWARE DE UN SISTEMA CNC

Un sistema CNC descrito en la Sección 1.3, requiere la intervención en conjunto de hardware y software integrados como una sola herramienta cuyo objetivo es realizar el mecanizado de forma automática.

El hardware necesario en una máquina CNC se divide en:

- Sistema Mecánico.
- Sistema Electrónico.

El software CAD – CAM - CNC es detallado en el capítulo 2.

El sistema electrónico se aborda en el capítulo 3.

### 1.6.1 SISTEMA DE COORDENADAS DE LOS EJES DE MOVIMIENTO

Para diseñar, simular y ejecutar un programa es necesario conocer el sistema de coordenadas y el tipo de máquina CNC sobre el cual se va a trabajar, la norma usada es la ISO-R841<sup>1</sup> “Control numérico de máquinas - Eje y nomenclatura de movimiento.”, la cual es reconocida internacionalmente por los principales diseñadores y constructores de máquinas CNC.

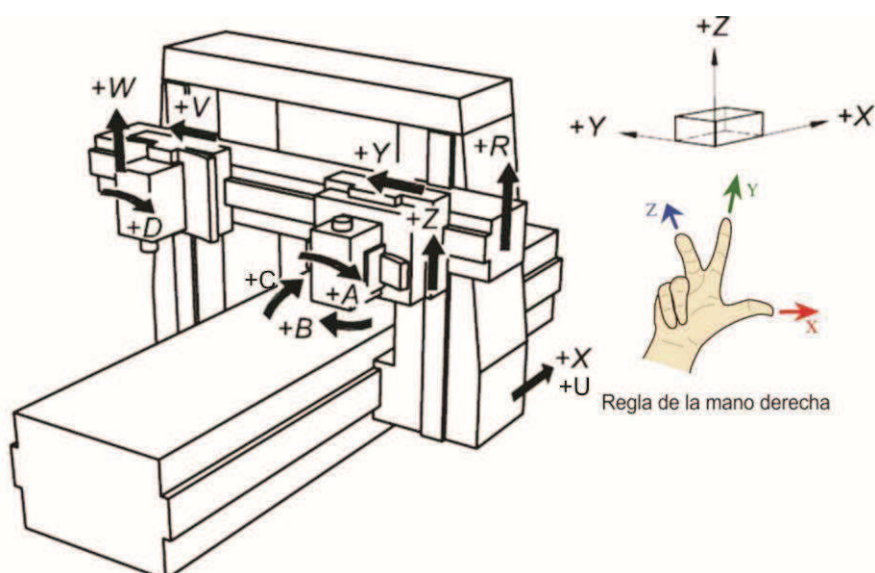


Figura 1.9 Sistema de coordenadas de un centro de mecanizado, tomado de [9].

<sup>1</sup>Norma ISO- R841, define la nomenclatura de los ejes de movimiento, su objetivo es simplificar la programación y facilitar la construcción y operación de máquinas CNC.

De acuerdo a esta norma y aplicada al presente proyecto se tiene:

#### 1.6.1.1 Eje X

Es el eje de traslación principal\_1 generalmente el de mayor longitud horizontal, es perpendicular al eje Z. Si el eje Z es vertical, el eje X es horizontal y su sentido positivo es hacia la derecha cuando se mira perpendicular al plano XY.

#### 1.6.1.2 Eje Y

Es el eje de traslación principal\_2 es perpendicular al plano XZ. El sentido positivo del eje Y viene dado por la regla de la mano derecha, que va desde la dirección positiva del eje Z a la dirección positiva del eje X.

#### 1.6.1.3 Eje Z

Es el eje de traslación principal\_3 perpendicular al plano XY. El eje Z es paralelo al movimiento de la herramienta o spindle.

Existen tres eje secundarios de traslación (U, V, W) y tres ejes terciarios P, Q y R paralelos a los ejes X, Y, Z, respectivamente.

Los ejes secundarios y terciarios pueden usarse para designar movimientos no paralelos a los ejes principales por ejemplo ejes de rotación.

Los ejes secundarios y terciarios amplían los grados de libertad, el presente proyecto puede ampliar su control a 9 ejes.

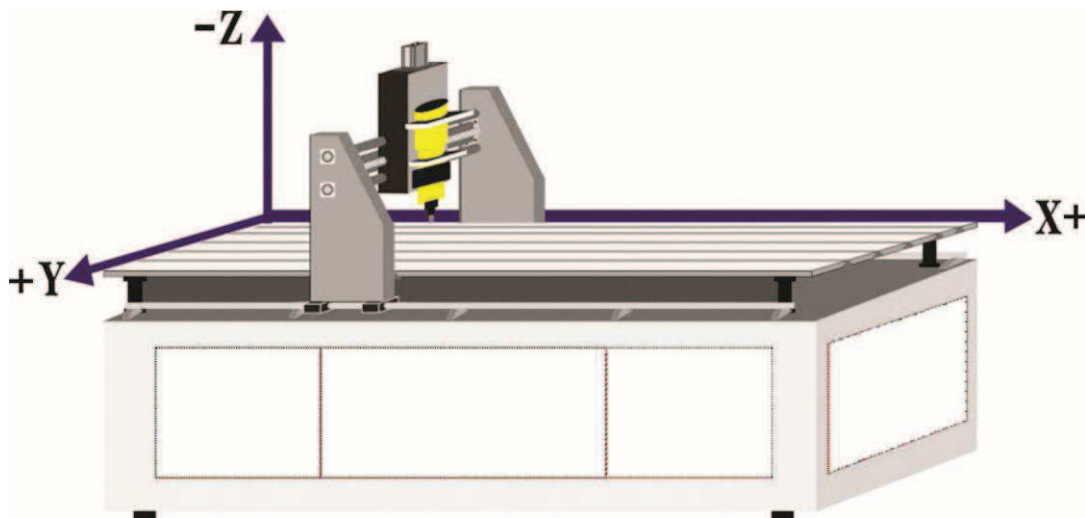


Figura 1.10 Sistema de coordenadas centro de mecanizado CNC.

Una vez definido el sistema de coordenadas de la máquina CNC, se procede con el diseño y selección de cada una de las partes constitutivas del sistema mecánico.

### **1.6.2 DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO**

El primer elemento a ser dimensionado es la estructura metálica principal que forman parte del centro de mecanizado CNC, la cual está conformado por un soporte principal, la mesa y los sistemas de: sujeción para el material, de guías lineales para cada eje y de transmisión de movimiento.

Los requerimientos del centro de mecanizado a construirse son:

Dimensiones máximas de la materia prima:

- Largo = 244 cm.
- Ancho = 122 cm.

Medidas que corresponden al largo y ancho de una plancha completa de acrílico o de MDF. Además se debe asegurar una profundidad de mecanizado de 5mm.

Las uniones y juntas de las distintas partes constitutivas se realizan por dos métodos.

- **Soldadura Eléctrica o de Arco**

Usada en las juntas que no se van a separar o se consideran fijas en la estructura, se utiliza electrodos E-6011, usados en sistemas con una tracción de hasta 60,000 libras por pulgada cuadrada (42,2 kg. /mm<sup>2</sup>) con lo cual se asegura que el sistema soporte el esfuerzo mecánico [10].

- **Pernos**

Usados para partes desmontables, pueden ser galvanizados, acerados, niquelados, milimétricos de tipo Allen.

#### **1.6.2.1 Estructura principal**

El criterio para el diseño de la estructura es la modularidad, debe ser fácilmente desmontable, ocupar el menor espacio posible para facilitar su transporte, todo esto asegurando firmeza y estabilidad en el sistema.

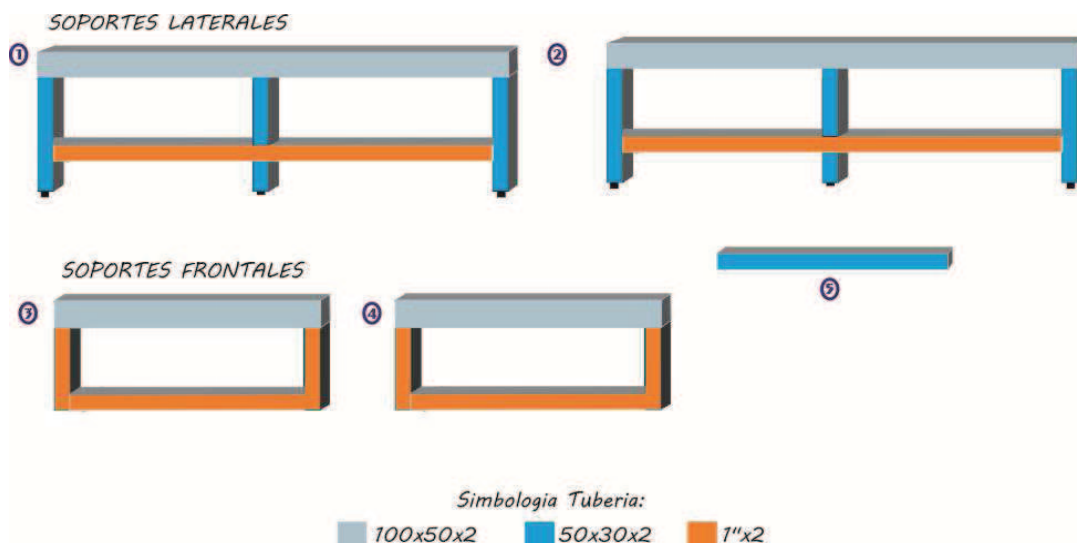


Figura 1.11 Componentes de la estructura principal.

Como se puede apreciar en la Figura 1.11, se tienen dos soportes laterales (1 y 2) que sirven para fijar las guías lineales del eje X, dos soportes frontales (3 y 4) para fijar las bases del motor y sujetar el tablero de control, un soporte transversal (5) que servirá para dar estabilidad a toda la estructura.

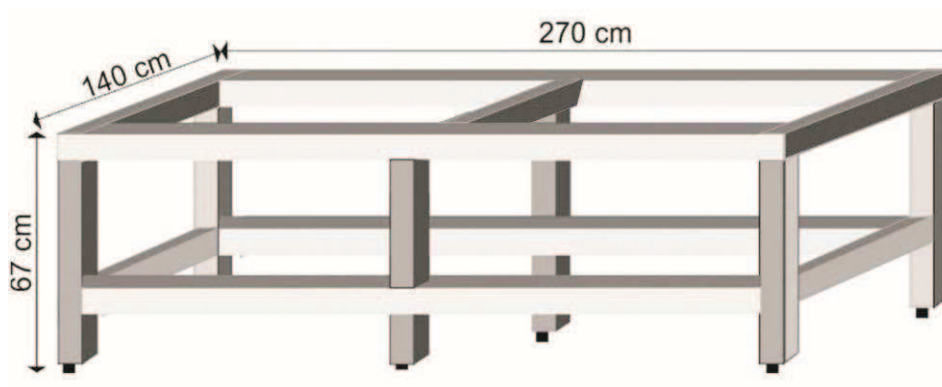


Figura 1.12 Estructura principal ensamblada.

Para asegurar la estabilidad y de nivel de la máquina CNC se cuenta con bases para ajustar el nivel como lo muestra la Figura 1.13.

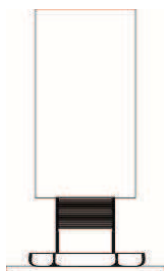


Figura 1.13 Ajuste de nivel.

### 1.6.2.2 Mesa de trabajo

La mesa de trabajo se divide en dos partes que son:

- Estructura de la mesa de trabajo.
- Base para la sujeción del material.

La estructura de la mesa de trabajo es elaborada de la siguiente manera:

- Cuadro principal con tubo cuadrado estructural de 50x50x3mm, un tubo rectangular de 50x30x3 [mm] más 6 soportes transversales de tubo cuadrado estructural de 1" x 2 [mm] , de manera que la mesa tiene firmeza durante el maquinado, no se pandee ante la fuerza ejercida durante la carga de material, el maquinado y extracción del producto terminado. Permitiendo de este modo un maquinado uniforme en toda el área de trabajo.

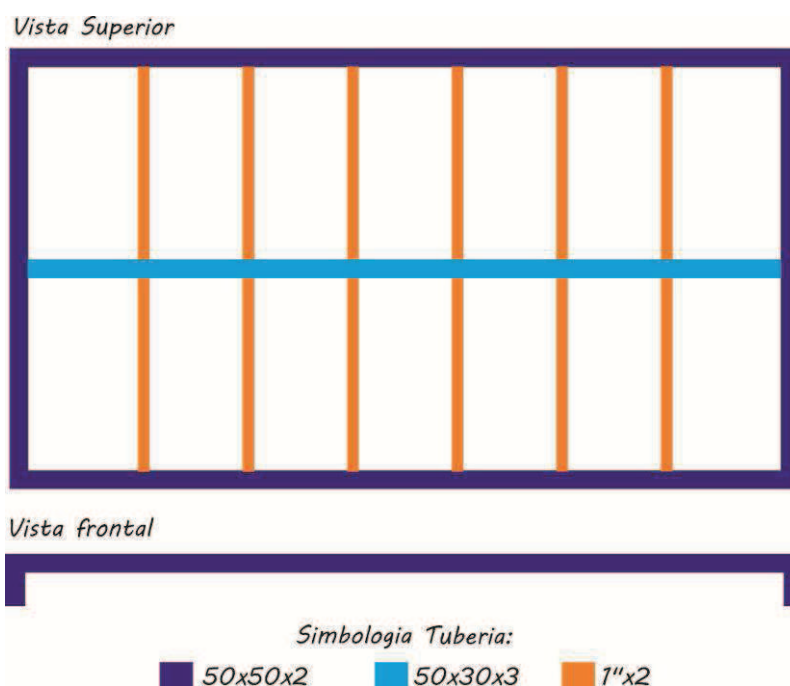


Figura 1.14 Soporte mesa de Trabajo.

- La Base para la sujeción del material está formada por un tablero de MDF ranurado de 10mm de espesor más 6 pinzas y un tablero de trabajo que servirán para sujetar el material.





Figura 1.15 Mesa de Trabajo.

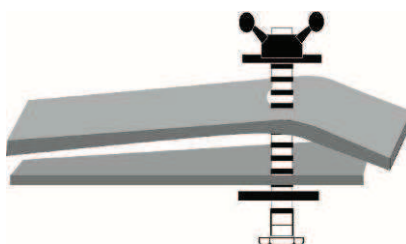


Figura 1.16 Pinza para sujeción del material.

La pinza está construida con un perno M8 más dos placas metálicas de 3 [mm] paralelas, la sujeción de material se la hace al ajustar la tuerca superior, este sistema es conocido como sujeción por bridas planas.

### 1.6.2.3 Sistemas de guías

Son encargados de guiar a cada eje asegurando estabilidad del sistema mientras se desplaza, de acuerdo a las características de la máquina las guías deben ser sólidas, con recubrimiento para evitar el desgaste, garantizando la precisión del sistema. De las opciones existentes en el mercado se elige guías lineales por ser las más eficientes, reducen la fricción al máximo ya que cada eje se encuentra acoplado directamente a un bloque móvil con rodamientos lineales. El cual consta de rulimanes dispuestos de tal forma que re-circulan en un canal cerrado, produciendo el movimiento lineal.

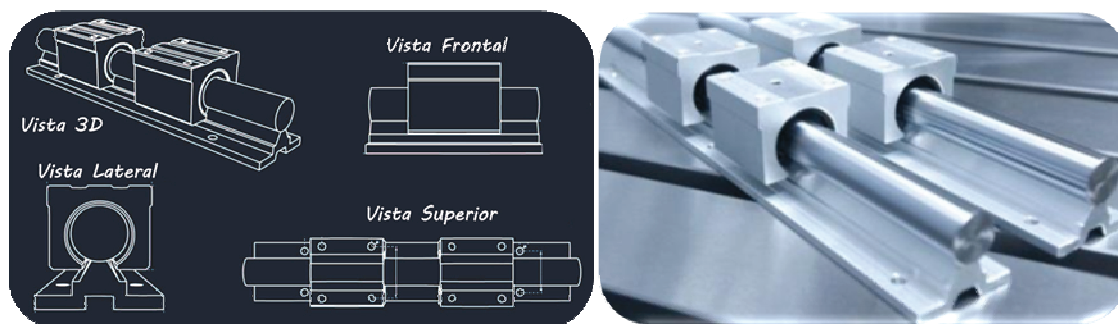


Figura 1.17 Guías Lineales SBR.

Las guías lineales para cada eje son:

- 2 Guías lineales tipo SBR25 con un diámetro de 25 [mm] y una longitud de 2500mm para el eje X.
- 2 Guías lineales tipo SBR20 con un diámetro de 20 [mm] y una longitud de 1300mm para el eje Y.
- 2 Guías lineales tipo SBR20 con un diámetro de 20 [mm] y una longitud de 300mm para el eje Z.

El método de selección y dimensionamiento de cada una de estas guías se describe más adelante en esta sección, al realizar el análisis de las fuerzas que intervienen en el proceso de mecanizado.

#### **1.6.2.4 Sistema de transmisión de movimiento**

El sistema de transmisión de movimiento es el punto más importante del sistema mecánico, influirá directamente la calidad del maquinado y el tiempo de vida útil de la máquina CNC. La eficacia depende de la calidad de los componentes, especialmente de su precisión.

El sistema de transmisión de movimiento genera el desplazamiento lineal de cada uno de los carros de los ejes X, Y, Z, existen varias alternativas para implementar dicho sistema, los principales son:

- Tornillo de Bolas re-circulantes o ballscrew.
- Cremalleras.
- Tornillos de potencia.
- Bandas dentadas.
- Cadenas.

Siendo los dos primeros los más usados, se elige el sistema de transmisión por tornillo de bolas re-circulantes conocidos como ballscrew, por su precisión y exactitud, el cual transforma la fuerza mecánica de un movimiento rotativo en un movimiento rectilíneo, garantizando un movimiento suave y continuo, con casi nada de juego mecánico “backlash”, con poco rozamiento [11].

Debido a su gran importancia se estudia detalladamente a continuación.

### 1.6.2.5 Tornillo de bolas re-circulantes

Las características de un tornillo de bolas re-circulantes son: resiste altas cargas de empuje, montaje con eficiencia mayor al 90%, ayudan a orientar, apoyar y mover con precisión los componentes de una máquina CNC.

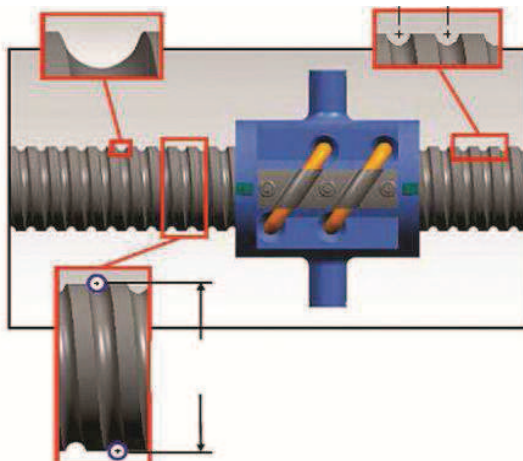


Figura 1.18 Tornillo de bolas re-circulantes.

La junta entre el tornillo y la tuerca se hace por cojinetes de bolas que giran alrededor del canal roscado y a su vez re-circulan por los hilos de la tuerca.

La carga sobre la tuerca del ballscrew se distribuye en un gran número de cojinetes de bolas, de modo que cada bola está sometida a una carga relativamente baja, por lo que su coeficiente de fricción es pequeño, lo que equivale a una eficiencia mecánica alta.

#### 1.6.2.5.1 Repetitividad y exactitud

La exactitud se define como el error máximo entre la posición indicada por software y la posición real alcanzada por la máquina. La repetitividad es la capacidad de posicionamiento del sistema para volver a una misma posición durante la operación. Un tornillo de bolas re-circulante tiene una repetitividad que oscila entre 0.1 [mm] a 1 [mm] sobre pulgada y una exactitud de  $\pm 1$  [mm/ Ft].

#### 1.6.2.5.2 Backlash

El Backlash o deslizamiento en la tuerca se produce al momento de realizarse el desplazamiento del tornillo de bolas re-circulantes en una u otra dirección, es la libre circulación o juego entre la tuerca y el tornillo. Se puede medir axial o radialmente.

A continuación se presenta un gráfico del backlash vs longitud.

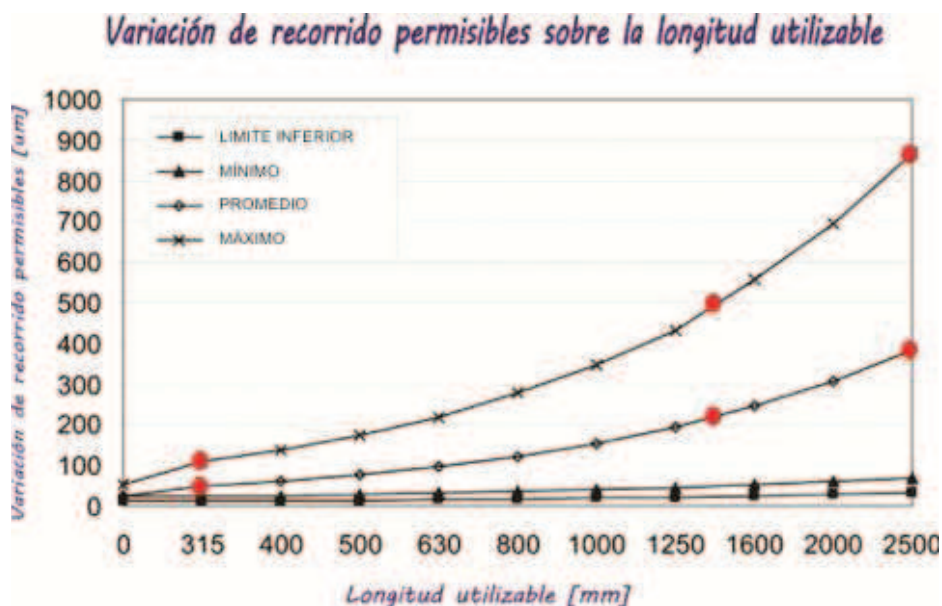


Figura 1.19 Backlash permisible vs Longitud, tomado de [12].

Los componentes individuales se selecciona en base a: precisión, repetitividad, las restricciones dimensionales, configuración de montaje, los requisitos de potencia y las condiciones ambientales.

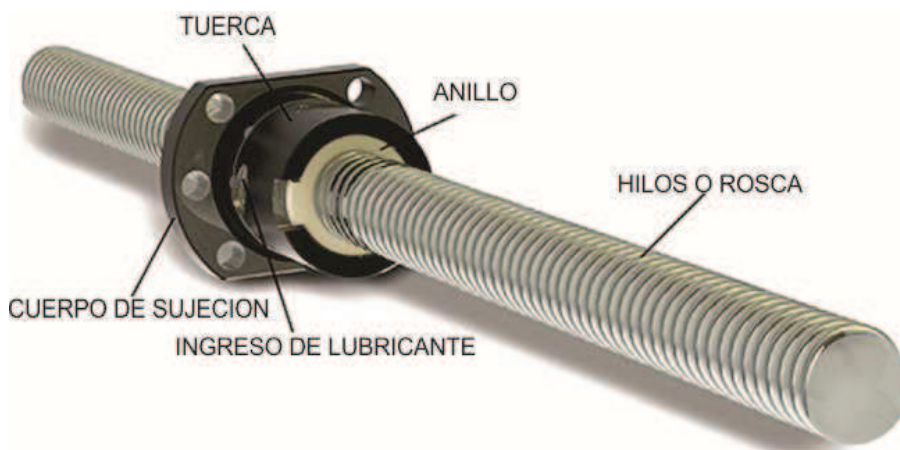


Figura 1.20 Conjunto tornillo - tuerca de bolas re-circulantes.

#### 1.6.2.5.3 Lubricación del sistema de transmisión de movimiento

El conjunto transmisión de movimiento nunca debe funcionar sin lubricación para mantener la ventaja de baja fricción, reduciendo al mínimo la resistencia a la rodadura entre las bolas y las ranuras o hilos del tornillo, lubricar adecuadamente evita el desgaste del sistema.

El lubricante líquido es la mejor opción ya que va hacia todos los componentes, sin embargo se separa fácilmente de las piezas en movimiento, por lo que se requiere de lubricación continua y de preferencia con lubricantes especiales que se adhieran a los metales. También se puede usar grasa, es menos costosa y requiere aplicación menos frecuente que el lubricante líquido, pero es difícil de mantener en el interior de la tuerca, tiende a acumularse en los extremos donde se reúnen virutas y partículas abrasivas.

El método de Selección de los tornillos de bolas re-circulantes se resume en el siguiente diagrama de flujo.

### Procedimiento de selección de un tornillo de bolas re-circulantes

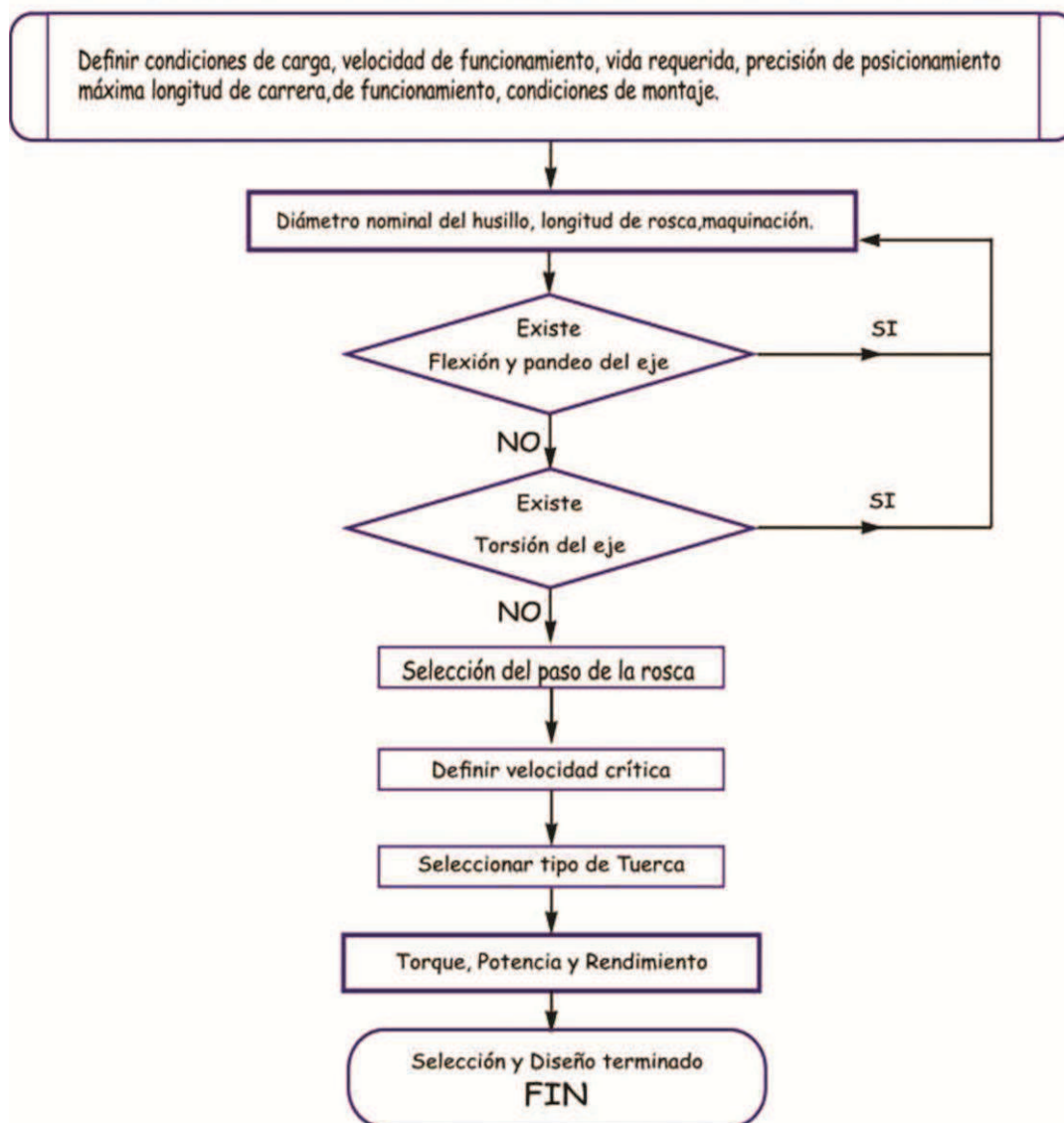


Figura 1.21 Diagrama de flujo de selección tornillo de bolas re-circulantes.

### 1.6.3 DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES PARA EL SISTEMA DE MOVIMIENTO DEL EJE Z [13]

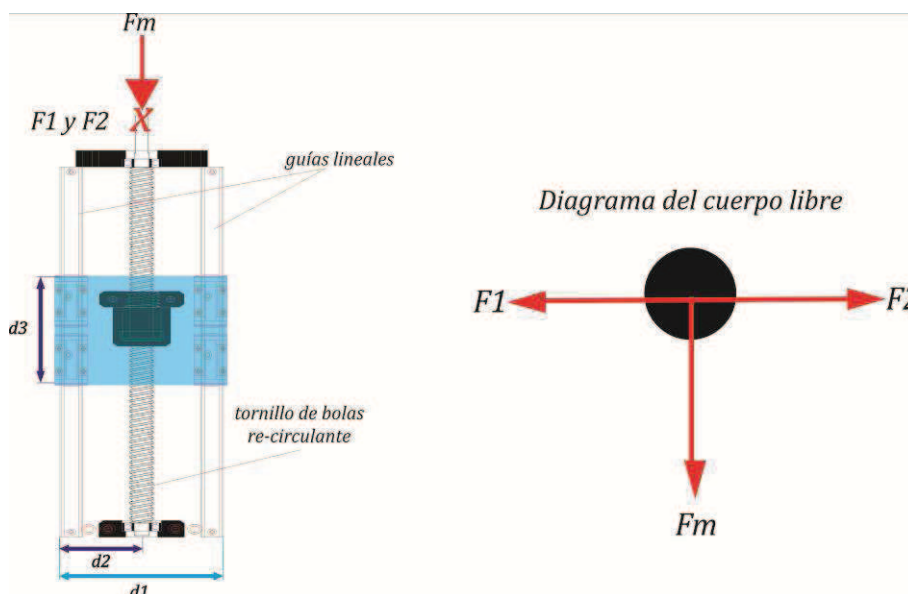


Figura 1.22 Fuerzas actuantes en el eje Z.

Como se observa en la Figura 1.22 sobre el sistema del eje Z actúan tres fuerzas que influyen directamente en el movimiento, al considerar la interacción entre las dos guías lineales, el tornillo de bolas re-circulantes y la fuerza necesaria para realizar el mecanizado se tiene:

$$F1 = -F2 = \frac{Fm}{2} \left( \frac{d3}{ds} \right) \quad \text{Ec. 1.1}$$

$$[N] = -[-N] = \left[ \frac{N}{2} \right] \left[ \frac{cm}{cm} \right] \quad \text{Análisis dimensional.}$$

Donde:

$Fm$  fuerza requerida para realizar el mecanizado en Newton [N].

$F1, F2$  fuerzas de interacción del carro con el spindle en Newton [N].

$d1$  distancia total de carro Z = 18 [cm] = 0.18 [m].

$d2$  distancia entre las guías lineales y el tornillo de bolas Z = 9 [cm] = 0.09 [m].

$d3$  separación entre los bloques y las guías lineales = 10 [cm] = 0.1 [m].

$ds$  distancia promedio entre el carro Z y el spindle = 15 [cm] = 0.15 [m].

La fuerza para el mecanizado es la resultante de la fuerza necesaria para realizar el corte o grabado en condiciones ideales (sin considerar cargas adicionales), más la fuerza del sistema para levantar el carro con el spindle.

$$Fm = Fm_{ideal} + Ws \quad \text{Ec. 1.2}$$

$$[N] = [N] \quad \text{Análisis dimensional.}$$

Donde:

$Ws$  = peso del carro Z más el spindle en Newton [N].

La fuerza de mecanizado ideal se la obtiene de los catálogos de una fresa comercial y de los catálogos para corte de acrílico y madera [14], [15].

$Fm_{ideal\ mínima} = 100$  [N] para el acrílico.

$Fm_{ideal\ máxima} = 300$  [N] para el acrílico.

$Fm_{ideal\ mínima} = 200$  [N] para la madera.

$Fm_{ideal\ máxima} = 450$  [N] para la madera.

Se diseña para las peores condiciones, por lo que se tiene  $Fm_{ideal} = 450$ [N]

$$Ws = 15\text{Kg} = 147 \text{ [N]}$$

Entonces:

$$Fm = Fm_{ideal} + Ws$$

$$Fm = 450 \text{ [N]} + 147 \text{ [N]}$$

$$Fm = 597 \text{ [N]}$$

$$F1 = -F2 = \frac{Fm}{2} \left( \frac{d3}{ds} \right)$$

$$F1 = -F2 = \frac{597}{2} \left( \frac{0.1}{0.15} \right) = 199 \text{ [N]}$$

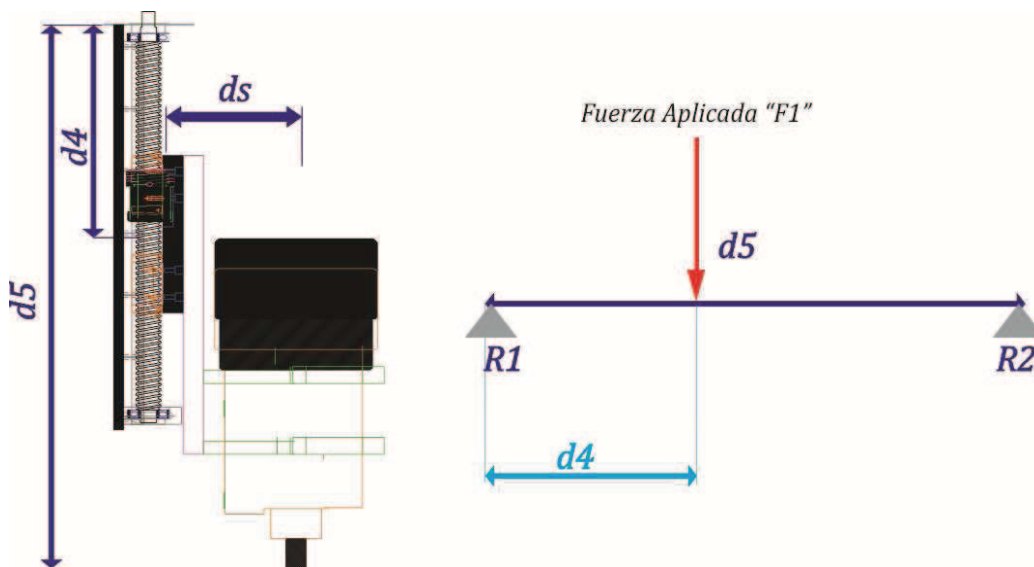


Figura 1.23 Momento de fuerza en el sistema de movimiento eje Z.

Analizando los momentos de fuerza de la Figura 1.23, se obtiene del Prontuario las expresiones que determinan el momento flector y la ecuación de la elástica, entonces se tiene:

$$R1 = \frac{F1 d4}{d5} \text{ y } R2 = -R1 \quad \text{Ec. 1.3}$$

$$[N] = \frac{[N][m]}{[m]} \text{ y } [N] = -[-N] \quad \text{Análisis dimensional.}$$

Donde:

$$d5 = 40 \text{ [cm]} = 0.4 \text{ [m].}$$

$$d4 = 15 \text{ [cm]} = 0.15 \text{ [m].}$$

$M$  es el momento flector en [Nm]

$$R1 = \frac{199 * 0.15}{0.40} = \frac{29.85}{0.40} = 74.62 \text{ N} = -R2$$

$$M = R1 (d5 - d4) \quad \text{Ec. 1.4}$$

$$Nmm = N[mm] \quad \text{Análisis dimensional.}$$

$$M = 74.62 \text{ [N]}(0.40 - 0.15) \text{ [mm]}$$

$$M = 18.65 \text{ Nm} = 18656.3 \text{ [Nmm]}$$



Con base a los datos proporcionados por el fabricante de las guías lineales de bolas re-circulantes para el acero 410 tratado térmicamente, se tiene un esfuerzo normal máximo de  $\sigma_{\text{acero}} = 102 \text{ N/mm}^2$  [16].

La resistencia de la guía lineal se calcula de la siguiente manera:

$$S = \frac{M}{\sigma_{\text{acero}}} \quad \text{Ec. 1.5 [17]}$$

$$[\text{mm}^3] = \frac{[\text{N}][\text{mm}]}{[\text{N}/\text{mm}^2]} \quad \text{Análisis dimensional.}$$

Donde:

*S* resistencia del husillo en  $[\text{mm}]^3$

$$S = \frac{M}{\sigma_{\text{acero}}} = \frac{18656.3 \text{ Nmm}}{102 \text{ mm}^2}$$

$$S = 182.90 \text{ mm}^3$$

El diámetro  $d$  en  $[\text{mm}]$ , de las guías lineales de bolas re-circulantes del eje Z se calcula con la siguiente expresión.

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 S}{\pi}} \quad \text{Ec. 1.6}$$

$$[\text{mm}] = \sqrt[3]{[\text{mm}^3]} \quad \text{Análisis dimensional.}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 * 182.90}{\pi}} = 12.30 \text{ [mm]}$$

Por lo que el diámetro teórico de las guías lineales del eje Z es de  $\varnothing \approx 13 \text{ mm}$ . Este valor nos sirve como referencia, debido a que se requiere implementar un sistema robusto para trabajo continuo, se sobredimensiona, por lo que las guías lineales seleccionadas son:

**Eje Z: 2 Guías Lineales de 300 [mm] de longitud y  $\varnothing$  20 [mm].**

El cálculo del tornillo de bolas re-circulantes se realiza de la siguiente forma:

El área transversal del tornillo está dada por:

$$A_T = \frac{F_1}{\sigma_{acero}} \quad \text{Ec. 1.7 [17]}$$

$$[mm^2] = \frac{[N]}{\frac{[N]}{mm^2}} \quad \text{Análisis dimensional.}$$

Donde:

$A_T$  Área transversal del tornillo de bolas re-circulantes en  $[mm^2]$

$$A_T = \frac{199 [N]}{2.585 [N/mm^2]} = 76.98 [mm^2]$$

El área transversal de un círculo es igual a  $A_T = \pi r^2$  Ec. 1.8 [18]

El diámetro está dado por  $D = 2r$  Ec. 1.9 [18]

Al remplazar se tiene que el diámetro está dado por:  $D = \sqrt{\frac{4A_T}{\pi}}$  Ec. 1.10

$$D = \sqrt{\frac{4 * 76.98 mm^2}{\pi}} = 9.9 [mm]$$

El diámetro teórico del tornillo de bolas re-circulantes del eje Z es de  $\varnothing \approx 10 [mm]$ .

Se requiere implementar un centro de mecanizado para trabajo continuo, se sobredimensiona de la siguiente manera:

**Eje Z: 1 Tornillo de Bolas Re-circulantes de 300 [mm] de longitud,  $\varnothing$  20mm y 5mm de paso.**

Calculo del Torque y Potencia factores importantes para la correcta selección de motor de eje Z.

**Torque:**  $T = \frac{Fm * P * S}{2000 * \pi * d}$  Ec. 1.11 [19]

**Potencia:**  $P = \frac{T * n}{9550}$  Ec. 1.12 [19]

Donde:

$T$  = Torque [Nm]

$F_m$  = Carga o fuerza necesaria [N]

$b$  = Paso de la rosca [mm]

$S$  = Factor de seguridad (entre el 1,25 a 2)

$\eta$  = Rendimiento mecánico (0,9)

$P$  = Potencia motor [Kw]

$n$  = Velocidad de giro [rev/min]

De donde se tiene:

Torque eje Z: 
$$T_z = \frac{F_1 * b * S}{2000 * \pi * \eta}$$

$$T_z = \frac{597 * 5 * 2}{2000 * \pi * 0.9} = 1.055 \text{ [Nm]}$$

Potencia eje Z: 
$$P_z = \frac{T * n}{9550} \quad \text{sea } n = 640 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

$$P_z = \frac{1.055 * 640}{9550} = 0.07 \text{ [Kw]} = 70.75 \text{ [W]}$$

#### 1.6.4 DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES PARA EL SISTEMA DE MOVIMIENTO DEL EJE Y

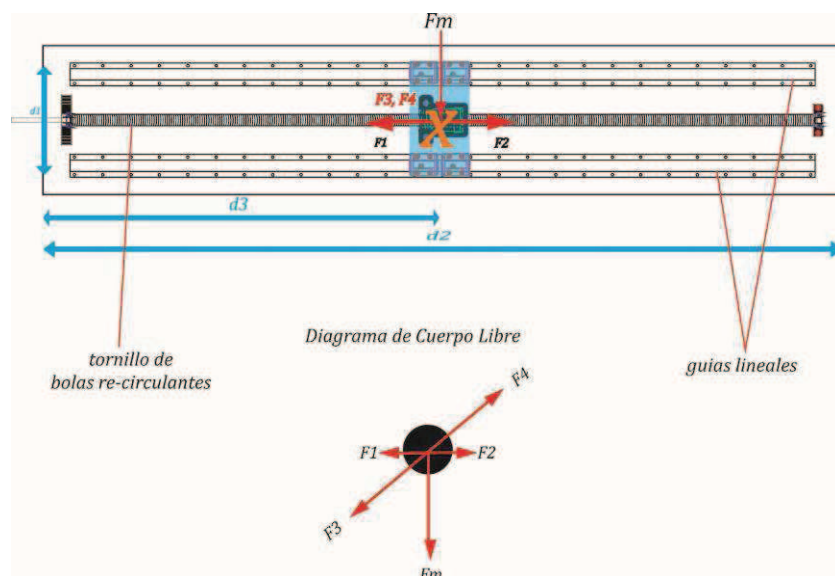


Figura 1.24 Fuerzas actuantes en el eje Y.

Como se muestra la Figura 1.24, sobre el eje Y, actúan cuatro fuerzas que influyen directamente en su movimiento, considerando la interacción entre las dos guías lineales y el tornillo de bolas re-circulantes, al aplicar la fuerza del mecanizado se tiene:

$$F3 = -F4 = \frac{Fm}{2} \left( \frac{ds}{d1} \right) \quad \text{Ec. 1.13}$$

Donde:

**Fm** es la fuerza requerida para realizar el mecanizado y mover el carro Y más todo el sistema del eje Z en Newton.

**F3, F4** fuerzas acción y reacción que soporta el sistema en Newton.

**F1, F2** fuerzas que se cancelan mutuamente (igual magnitud pero sentido contrario).

**d1** distancia entre las dos guías lineales del eje Y = 15.5 [cm] = 0.155 [m].

**d2** longitud del eje Y = 150 [cm] = 1.5 [m].

**d3** longitud media del eje Y = 75 [cm] = 0.75 [m].

**ds** distancia promedio entre el carro Z y el carro Y = 7 [cm] = 0.07 [cm].

Resolviendo se tiene:

$$Fm = Fm_{eje Z} + Ws \quad \text{Ec. 1.14}$$

Donde:

**Ws** peso de todo el sistema del eje Y en Newton [N].

De los cálculos del eje Z se tiene **Fm<sub>eje Z</sub>** = 597[N].

**Ws** = 40 [Kg] = 392 [N].

$$Fm = Fm_{ideal} + Ws$$

$$Fm = 597 [N] + 392 [N] = 989 [N]$$

$$F3 = -F4 = \frac{Fm}{2} \left( \frac{ds}{d1} \right)$$

$$F3 = -F4 = \frac{989}{2} \left( \frac{0.07}{0.155} \right) = 223.32 [N]$$

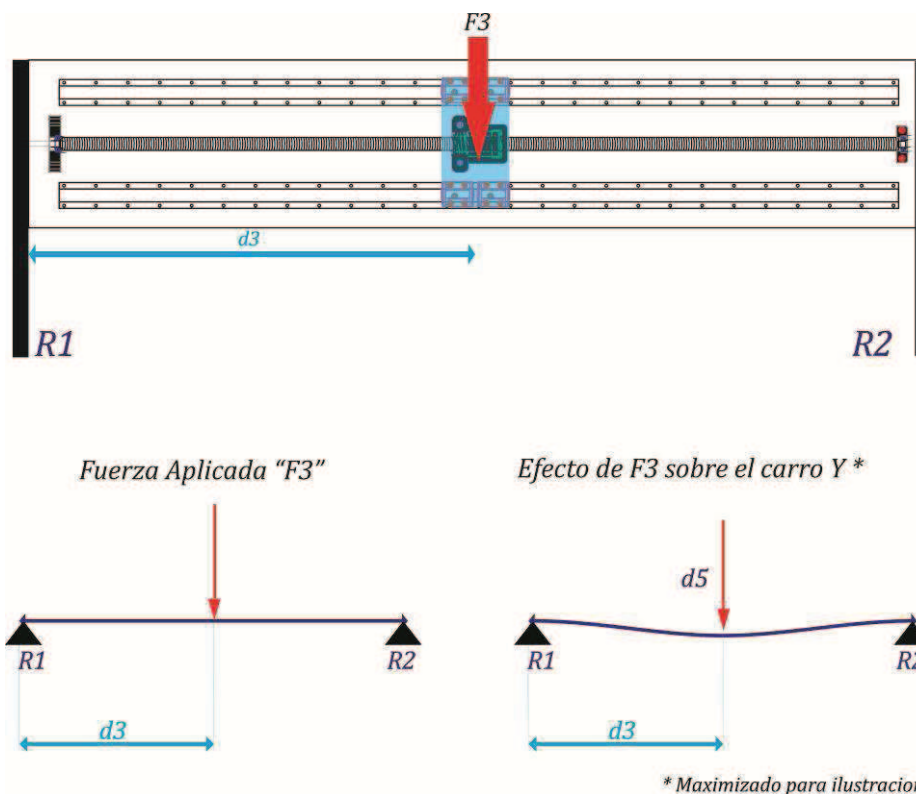


Figura 1.25 Momento de fuerza y efecto en el sistema de movimiento eje Y.

Como se muestra en la Figura 1.25, el máximo esfuerzo se realiza en la mitad del carro Y produciendo una curvatura,  $R1$  y  $R2$  son los dos soportes laterales, del Prontuario se obtiene las expresiones que determinan el momento flector, la ecuación de la elástica es:

$$R1 = \frac{F3 \cdot d3}{d2} \text{ y } R2 = -R1 \quad \text{Ec 1.15}$$

$$R1 = \frac{223.32 \cdot 0.75}{1.5} = 111.66 \text{ [N]} = -R2$$

$M$  es el momento flector

$$M = R1 (d5 - d4) \quad \text{Ec. 1.16}$$

$$M = 111.66 (1.5 - 0.75) = 83.74 \text{ [Nm]} = 83745 \text{ [Nmm]}$$

De los datos proporcionados por el fabricante de las guías lineales se tiene un esfuerzo normal máximo de  $\sigma_{\text{acero}} = 115 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ , para el acero 410 tratado térmicamente para endurecerlo [16].

La resistencia de las guías se calcula de la siguiente manera:

$$S = \frac{M}{\sigma_{\text{acero}}} \quad \text{Ec. 1.17 [17]}$$

$$S = \frac{M}{\sigma_{\text{acero}}} = \frac{93745 \text{ [Nmm]}}{115 \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]} = 727.61 \text{ [mm}^3\text{]}$$

El diámetro de las guías lineales del eje Z se calcula con la siguiente expresión.

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 S}{\pi}} \quad \text{Ec. 1.18 [17]}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 * 727.61 \text{ [mm}^3\text{]}}{\pi}} = 19.24 \text{ [mm]}$$

Por lo que el diámetro las guías lineales seleccionadas es:

**Eje Y: 2 Guías Lineales de 1300mm de longitud y Ø 20mm.**

Para el cálculo de los tornillos de bolas re-circulantes se tiene:

En base a los datos proporcionados por el fabricante de los tornillos de bolas re-circulantes tiene un esfuerzo normal máximo de  $\sigma_{\text{acero}} = 2.585 \text{ (N/mm}^2\text{)}$  [16].

El área transversal está dada por:

$$A_T = \frac{F_B}{\sigma_{\text{acero}}} \quad \text{Ec.1.19 [17]}$$

Donde:

$A_T$  Área transversal del tornillo de bolas re-circulantes es:

$$A_T = \frac{223.32 \text{ [N]}}{2.585 \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]} = 86.39 \text{ [mm}^2\text{]}$$

El diámetro está dado por:  $D = \sqrt{\frac{4A_T}{\pi}}$  Ec. 1.20

$$D = \sqrt{\frac{4 * 86.39 \text{ mm}^2}{\pi}} = 10.50 \text{ [mm]}$$

Por lo que el diámetro teórico para el tornillo de bolas re-circulantes del eje Y es de  $\text{Ø} \approx 11\text{mm}$ .

Debido a la implementación de un centro de mecanizado para trabajo continuo, se sobredimensiona quedando de la siguiente manera:

**Eje Y: 1 Tornillo de Bolas Re-circulantes de 1300 [mm] de longitud, Ø 20 [mm] y 5 [mm] de paso.**

Cálculo de Torque y Potencia, factores importantes para la correcta selección de motor de eje Y.

$$\text{Torque:} \quad T = \frac{Fm * D * S}{2000 * \pi * \eta} \quad \text{Ec. 1.21 [19]}$$

$$\text{Potencia:} \quad P = \frac{T * n}{9550} \quad \text{Ec. 1.22 [19]}$$

Donde:

$T$  = Torque [Nm]

$Fm$  = Carga o fuerza necesaria [N]

$D$  = Paso de la rosca [mm]

$S$  = Factor de seguridad (entre 1,25 a 2)

$\eta$  = Rendimiento mecánico (0,9)

$P$  = Potencia motor [Kw]

$n$  = Velocidad de giro [rev/min]

**Torque eje Y:**

$$Ty = \frac{Fm * D * S}{2000 * \pi * \eta}$$

$$Ty = \frac{989 * 5 * 2}{2000 * \pi * 0.9} = 1.74 \text{ [Nm]}$$

**Potencia eje Y:**

$$Py = \frac{T * n}{9550}$$

$$\text{Sea } n = 640 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

$$Py = \frac{1.74 * 640}{9550} = 0.116 \text{ Kw} = 116.6 \text{ [W]}$$

### 1.6.5 DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES PARA EL SISTEMA DE MOVIMIENTO DEL EJE X

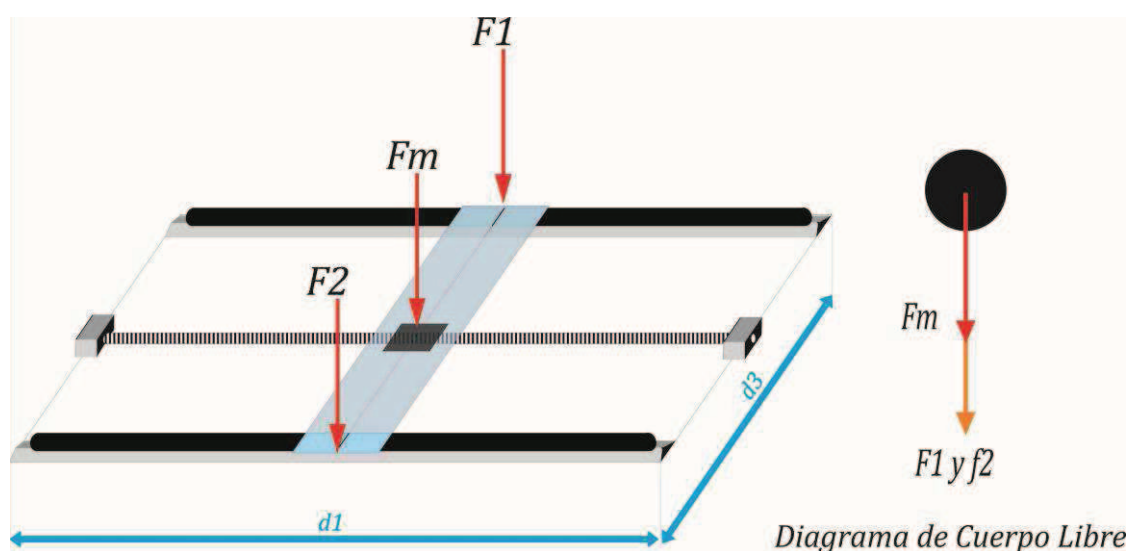


Figura 1.26 Fuerzas actuantes en el eje X.

Como muestra la Figura 1.26, sobre el eje X actúan tres fuerzas que influyen directamente en su movimiento, considerando la interacción entre las dos guías lineales y el tornillo cuando se aplica la fuerza para el mecanizado, se tiene:

$$F1 = -F2 = \frac{Fm}{2} \left( \frac{d3}{d2} \right) \quad \text{Ec. 1.23}$$

Donde:

$Fm$  es la fuerza requerida para realizar el mecanizado y mover todo el sistema de los ejes Y, Z está dada en Newton [N]

$F1, F2$  fuerzas que requiere el sistema en las guías lineales.

$d1$  distancia total de carro eje X = 250 [cm] = 2.5 [m].

$d2$  distancia al centro de eje X = 125 [cm] = 1.25 [m].

$d3$  separación entre las guías lineales = 150 [cm] = 1.5 [m].

$$Fm = Fm_{zy} + Ws \quad \text{Ec. 1.25}$$

Donde:

$Ws$  = peso del carro eje X en [N]

$Ws = 30$  [Kg] = 294 [N]



$$Fm = Fm_{ideal} + Ws$$

$$Fm = 989\text{N} + 294 \text{ [N]} = 1283 \text{ [N]}$$

$$F1 = -F2 = \frac{Fm}{2} \left( \frac{d3}{d1} \right)$$

$$F1 = -F2 = \frac{1283}{2} \left( \frac{1.5}{2.5} \right) = 384.9 \text{ [N]}$$

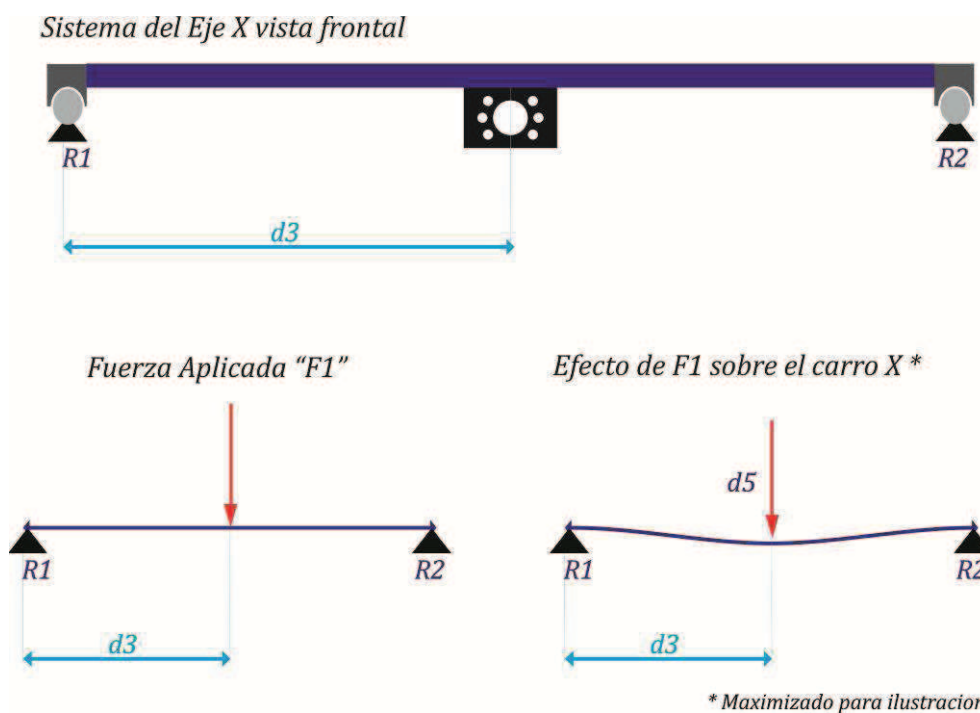


Figura 1.27 Momento de fuerza en el sistema de movimiento eje X.

De la Figura 1.27, obtenemos en el Prontuario las expresiones que determinan el momento flector, la ecuación de la elástica es:

$$R1 = \frac{F1 d3}{d5} \text{ y } R2 = -R1 \tag{Ec. 1.26}$$

Donde:

$$d5 = 150 \text{ [cm]} = 1.5 \text{ [m]}$$

$$d3 = 75 \text{ [cm]} = 0.75 \text{ [m]}$$

$M$  es el momento flector

$$R1 = \frac{384.9 * 0.75}{1.5} = 769.8 = 192.45 N = -R2$$

$$M = R1 (d5 - d4) \quad \text{Ec. 1.27}$$

$$M = 192.45(0.75) = 144.33 [Nm] = 144330 [Nmm]$$

Con base en los datos proporcionados por el fabricante, las guías lineales son de acero templado con un esfuerzo normal máximo de  $\sigma_{acero} = 102 \text{ (N/mm}^2\text{)}$  [16].

La resistencia las guías lineales se calculan de la siguiente manera:

$$S = \frac{M}{\sigma_{acero}} \quad \text{Ec. 1.28}$$

$$S = \frac{M}{\sigma_{acero}} = \frac{144330 \text{ Nmm}}{102 \text{ N/mm}^2} = 1414.07 [\text{mm}^3]$$

El diámetro de las guías lineales del eje X se calcula con la siguiente expresión:

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 S}{\pi}} \quad \text{Ec. 1.29 [17]}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 * 1414.07}{\pi}} = 24.13 [\text{mm}]$$

Teóricamente el diámetro de las guías lineales del eje X es de  $\varnothing \approx 24\text{mm}$ , el cual sirve como referencia, debido a las características del centro de mecanizado a implementarse se sobredimensiona, por lo que las guías lineales seleccionadas son:

**Eje X: 2 Guías Lineales de 2500mm de longitud y  $\varnothing$  30mm.**

Para el cálculo del tornillo de bolas re-circulantes se tiene:

De los datos proporcionados por el fabricante de los tornillos de bolas re-circulantes el esfuerzo normal máximo del acero es de  $\sigma_{acero} = 2.014 \text{ (N/mm}^2\text{)}$  [16].

El área transversal del tornillo está dada por:

$$A_T = \frac{F1}{\sigma_{acero}} \quad \text{Ec. 1.30 [17]}$$

Donde:

$A_T$  Área transversal del tornillo de bolas re circulantes

$$A_T = \frac{384.9 \text{ N}}{2.014 \text{ N/mm}^2} = 191.11 \text{ [mm}^2\text{]}$$

De las ecuaciones 1.8 y 1.9 se tiene:

$$\text{El diámetro está dado por: } D = \sqrt{\frac{4A_T}{\pi}} \quad \text{Ec. 1.31 [17]}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 191.11 \text{ mm}^2}{\pi}} = 15.62 \text{ mm}$$

El diámetro teórico del tornillo de bolas re-circulantes del eje X es de  $\varnothing \approx 16\text{mm}$ .

Debido a que se requiere implementar un centro de mecanizado para trabajo continuo, se sobredimensiona quedando de la siguiente manera:

**Eje X: 1 Tornillo de Bolas Re-circulantes de 2500mm de largo,  $\varnothing$  25mm y 5mm de paso.**

A continuación se calcula el Torque y la Potencia, factores importantes para la correcta selección de motor de eje X.

$$\text{Torque:} \quad T = \frac{F_m * P * S}{2000 * \pi * n} \quad \text{Ec. 1.33 [19]}$$

$$\text{Potencia:} \quad P = \frac{T * n}{9550} \quad \text{Ec. 1.34 [19]}$$

Donde:

$P$  = Paso de la rosca [mm]

$S$  = Factor de seguridad = 3

$\eta$  = Rendimiento mecánico (0,9)

$n$  = Velocidad de giro [min]

De donde se tiene:

$$\text{Torque eje X:} \quad T_z = \frac{F_m * P * S}{2000 * \pi * n}$$

$$T_z = \frac{1283 * 5 * 3}{2000 * \pi * 0.9} = 3.40 \text{ [Nm]}$$

Potencia eje X:  $P_z = \frac{T \cdot n}{9550}$  sea  $n = 640 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$

$$P_z = \frac{3.40 \cdot 640}{9550} = 0.228 \text{ [Kw]} = 228.07 \text{ [W]}$$

### 1.6.6 ACOPLER MECÁNICOS ENTRE EL TORNILLO DE BOLAS RE-CIRCULANTE Y LOS MOTORES PASO A PASO

Cuando un sistema CNC mueve los ejes aparecen fenómenos no deseados como es resonancia mecánica, la cual es eliminada del sistema para evitar pérdida de pasos y por consiguiente de precisión del centro de mecanizado. Por lo cual se colocan acoples mecánicos que reduzcan los efectos de la resonancia.

#### 1.6.6.1 Resonancia

Un motor paso a paso tiene una respuesta oscilante al intentar alcanzar la posición deseada, como muestra la Figura 1.28. El tiempo de crecimiento, es el tiempo que tarda el rotor del motor en llegar a la posición deseada, de esta manera se puede obtener la velocidad máxima, pero cuando llega a la posición deseada ocurre un sobre impulso que desvía la posición del rotor, por lo cual se requiere de un tiempo de estabilización, que es el periodo en el cual el sobre impulso cae a un 5% de la amplitud de un paso.

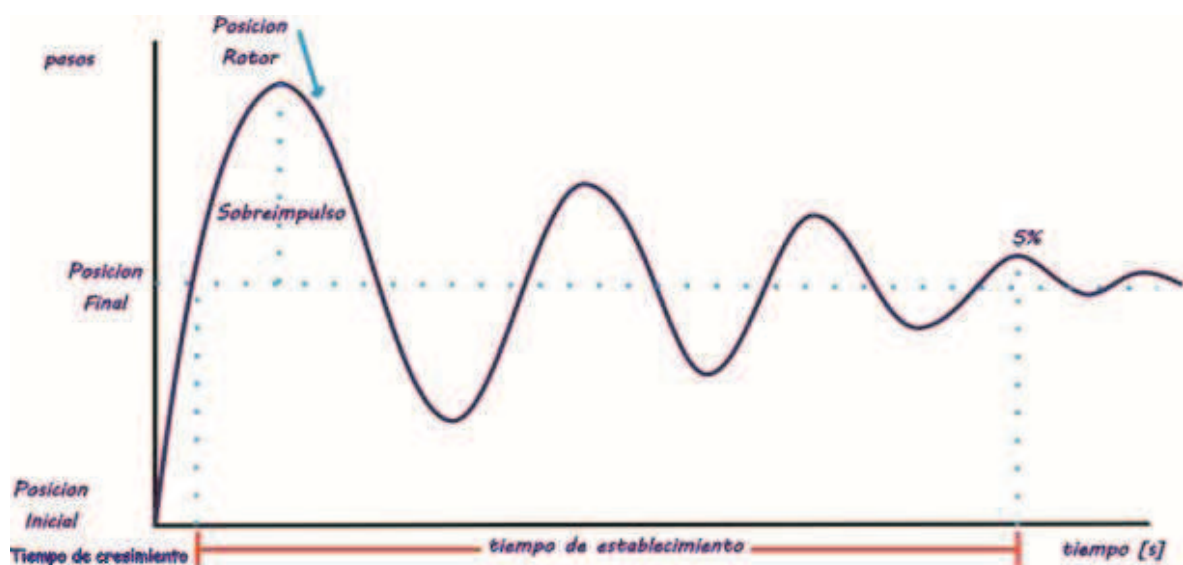


Figura 1.28 Respuesta PAP a un paso.

Si las oscilaciones son muy fuertes aparece el fenómeno conocido como resonancia, que depende de la relación entre los pasos y la frecuencia de oscilación natural del rotor, si no se corrige este defecto las oscilaciones crecen hasta que en algún momento son mayores que el torque del motor, provocando que el rotor gire a una posición no deseada.

#### 1.6.6.2 Compensadores de los efectos de la resonancia

Uno de los métodos de compensar las oscilaciones es añadir al sistema una fuerza en sentido opuesto al movimiento, es decir añadir fricción adicional, lo que produce un torque proporcional a la velocidad, disminuyendo de esta manera las oscilaciones del rotor, sin embargo para altas frecuencias se limitan el torque, la aceleración y desaceleración debido a la fricción añadida. Por lo que se debe de manejar la relación de fricción añadida con torque resultante de manera que el sistema no se vea afectado.

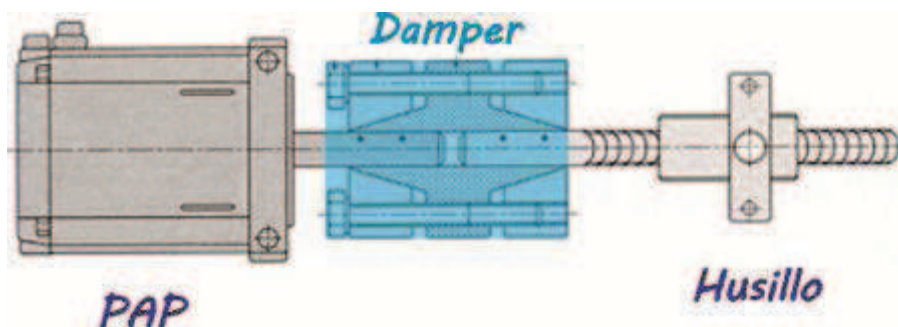


Figura 1.29 Sistema PAP – Dámper – Husillo.



Figura 1.30 Modelos de dampers para máquinas CNC.

Los elementos mecánicos utilizados para este propósito se denominan dampers, coupling o matrimonios, son propios de cada aplicación debido a las características antes mencionadas. Los usados en el presente proyecto se muestra en la Figura 1.30.

## 1.7 IMPLEMENTACIÓN Y COMPONENTES DEL SISTEMA MECÁNICO

La implementación del sistema mecánico se realiza considerando los aspectos descritos en el presente capítulo, se construye primero la estructura principal, por ser la base del sistema.



Figura 1.31 Partes constitutivas de la mesa de trabajo.

Como se aprecia en la Figura 1.31, la estructura es desmontable, por lo que se tiene modularidad del sistema, facilitando su transporte e instalación en áreas de difícil acceso. Cada una de estas partes se ensamblan usando pernos de acero milimétricos.

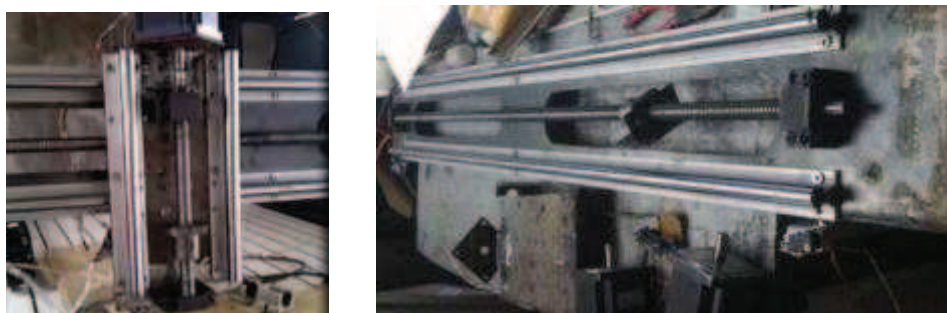


Figura 1.32 (a) Carro Eje Y, (b) Carro eje Z.

Cada carro (X, Y, Z) cuenta con el sistema de guías lineales, el tornillo de bolas re-circulantes con sus soportes y la base de sujeción para el motor.





Figura 1.33 Estructura principal más sistema de transmisión eje X.

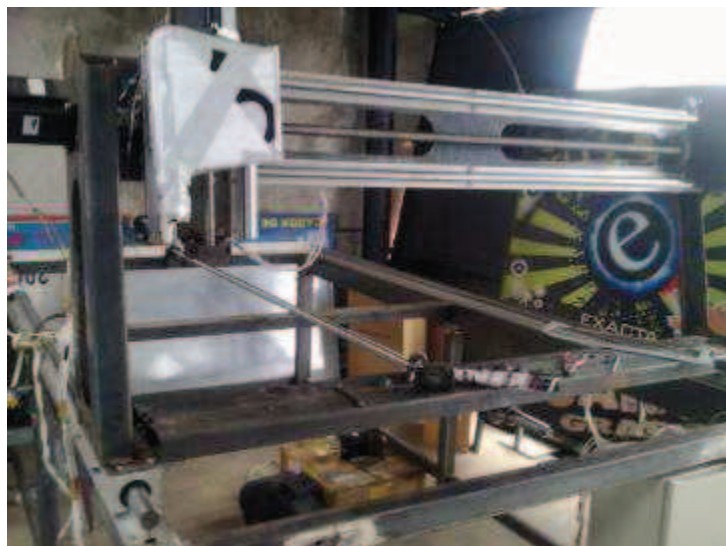


Figura 1.34 Centro de mecanizado CNC ensamblado, primeras pruebas.



Figura 1.35 Centro de mecanizado CNC ensamblado, primeras pruebas.



Figura 1.36 Pruebas de case.

En la primera fase, se somete a todo el conjunto mecánico a pruebas de resistencia, vibración, estabilidad, equilibrio y motricidad, obteniendo los primeros resultados mostrados en el capítulo 4, por lo que se modifico la altura del sistema de movimiento eje Y, acortando la distancia con la mesa de trabajo ya que a mayor altura aumentan los efectos de la vibración. Se refuerza el carro del eje X, en especial el bloque de unión entre la tuerca del tornillo de bolas re-circulantes y el puente, de esta forma se evita el desnivel entre las guías; una vez corregidos todos estos detalles, el resultado final es el siguiente.



Figura 1.37 Mesa principal ensamblada.



El sistema de transmisión de movimiento implementado es el siguiente:

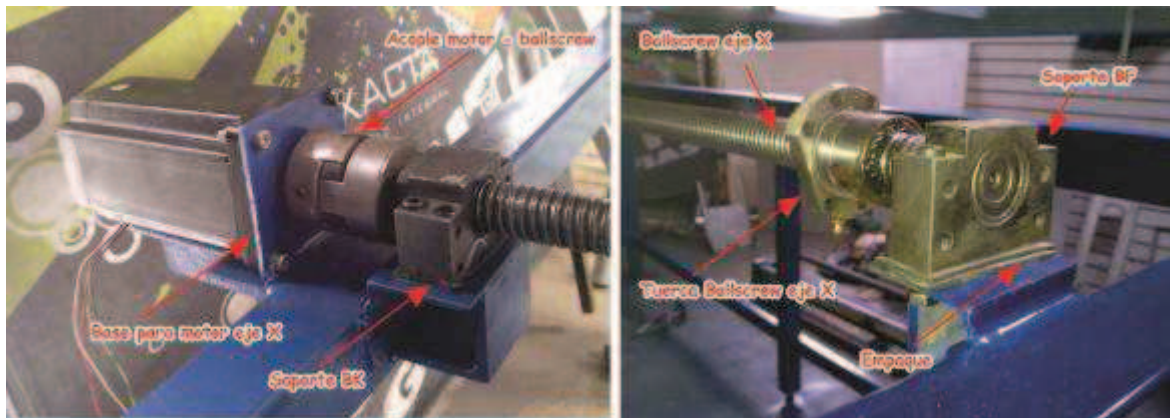


Figura 1.38 Sujeción motor PAP – tornillo de bolas re-circulantes eje X.

Para corregir los efectos de la vibración se coloca una base en forma de L para el motor a pasos del eje X y empaques en las juntas de los soportes BK, BF con la estructura principal, el dämpfer usado es un lovejoy con empaque de caucho y sistema de sujeción por prisioneros.

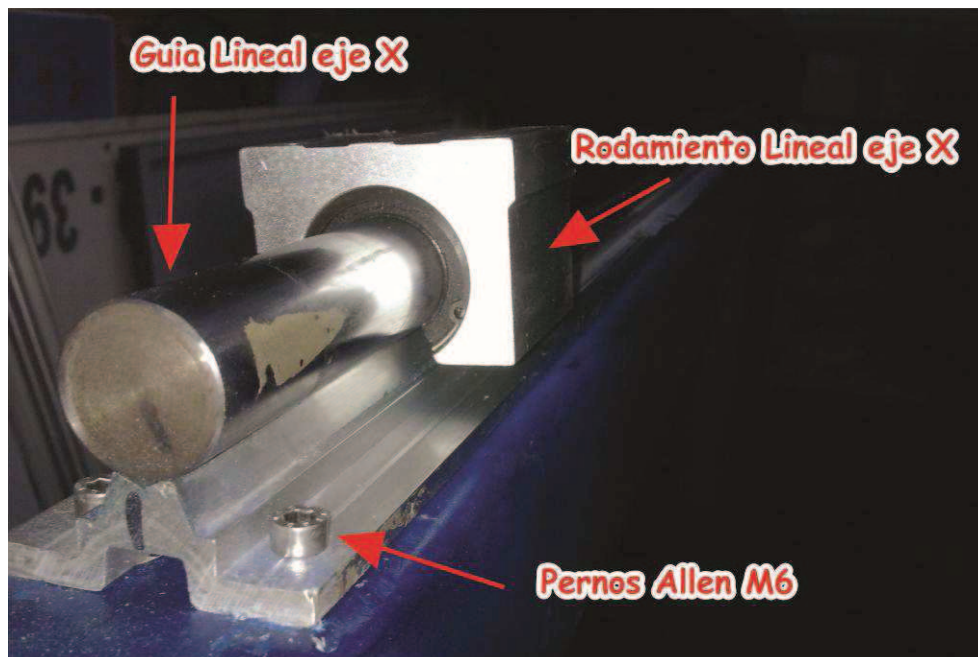


Figura 1.39 Sistema de guías lineales eje X.

El sistema consta de dos guías cilíndricas de 30 milímetros de diámetro, acopladas a un perfil omega, cada una tiene dos bloques de rodamientos lineales, los cuales deben ser lubricados antes de su instalación.

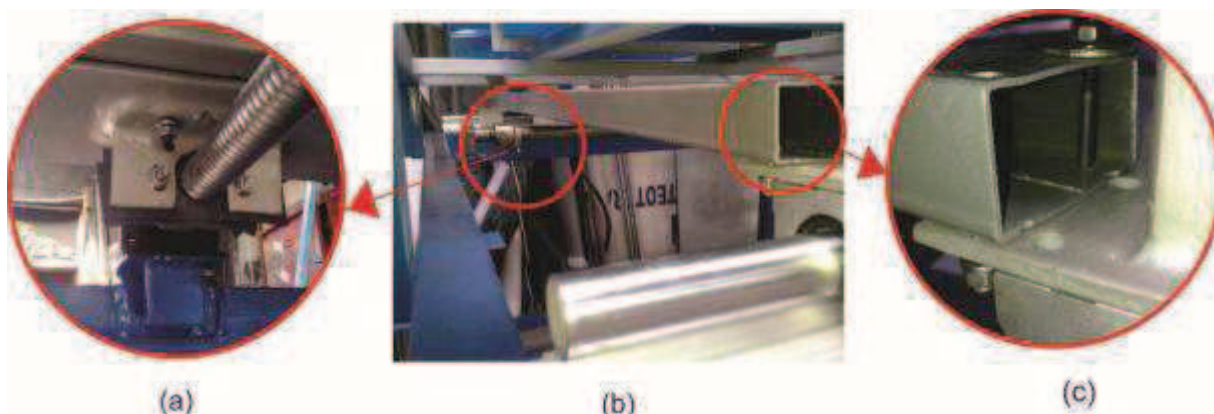


Figura 1.40 Carro eje X.

La Figura 1.40, muestra el carro del eje X está compuesto por dos ejes transversales de tubo cuadrado (b), sujetos a los soportes laterales del eje Y (c), para el movimiento se tiene una placa fijada a los soportes y a la tuerca del ballscrew (a).

Cuando se ensambla el sistema, se debe verificar el paralelismo entre las dos guías y la altura a la que se encuentra el ballscrew, el movimiento debe ser suave y continuo.

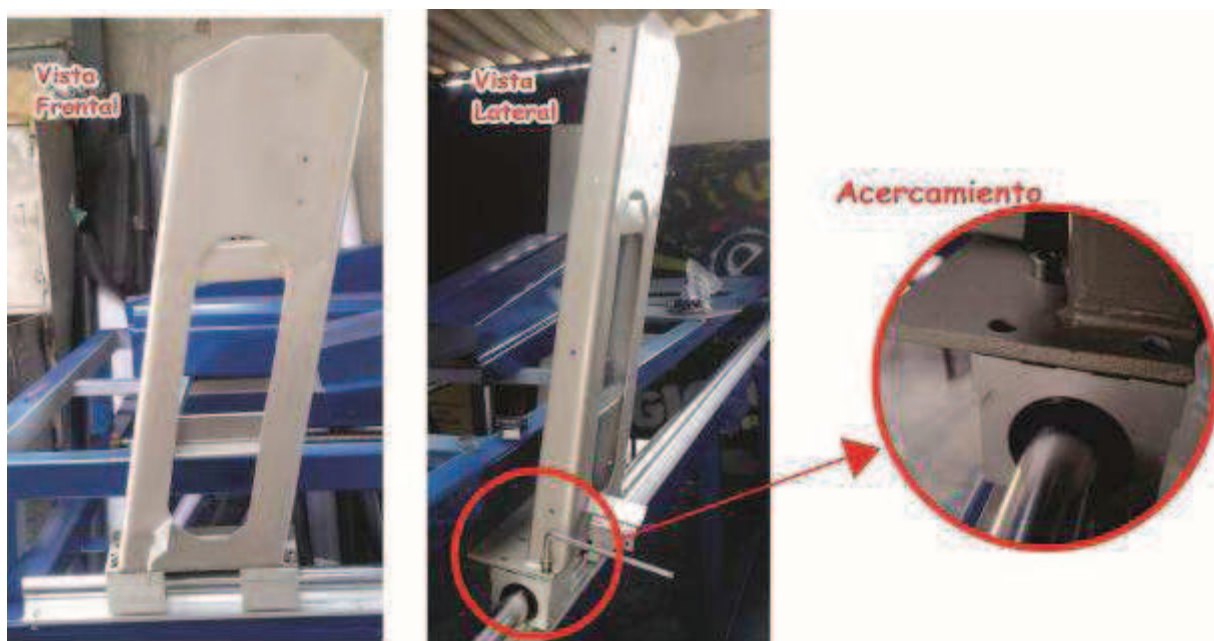


Figura 1.41 soportes laterales eje Y.

Se tiene dos soportes laterales para el carro del eje Y, los cuales van sujetos a los bloques de rodamientos de las guías lineales del eje X mediante pernos Allen M8.

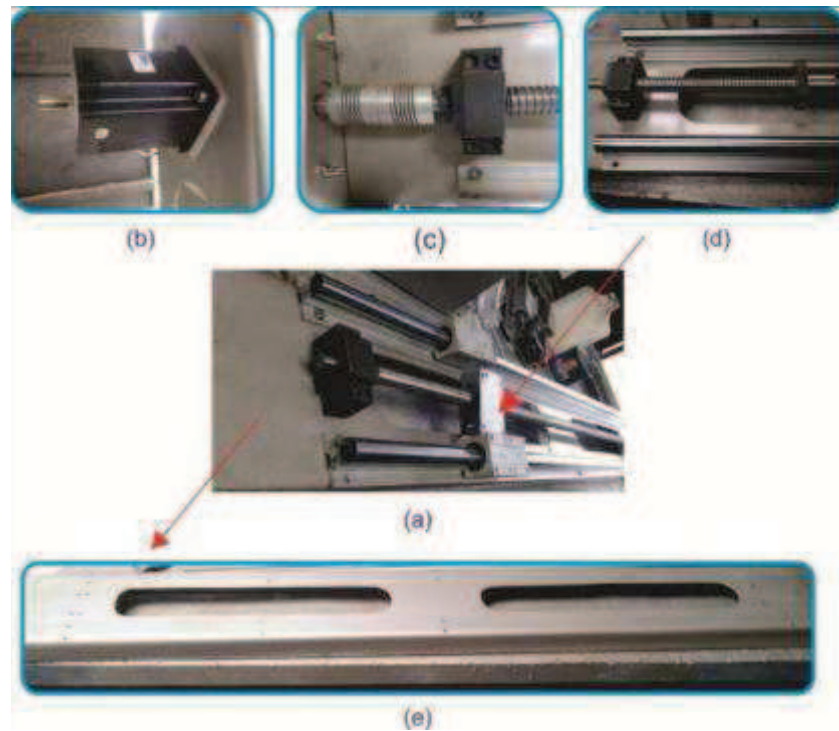


Figura 1.42 Sistema de movimiento eje Y.

En la Figura 1.42 se muestra, el sistema completo del eje Y (a), la base del motor se encuentra en el soporte lateral (b), el acople entre el motor y el ballscrew se realiza por medio de dampers de aluminio (c), el montaje de las guías lineales y el ballscrew con los soportes BK y BF (d), la base principal del carro Z se muestra en el literal (e).

Todos los elementos son sujetos con pernos milimétricos Allen fijados con traba pernos, el sistema no puede ser ajustado por completo hasta no montar el carro del eje Z.

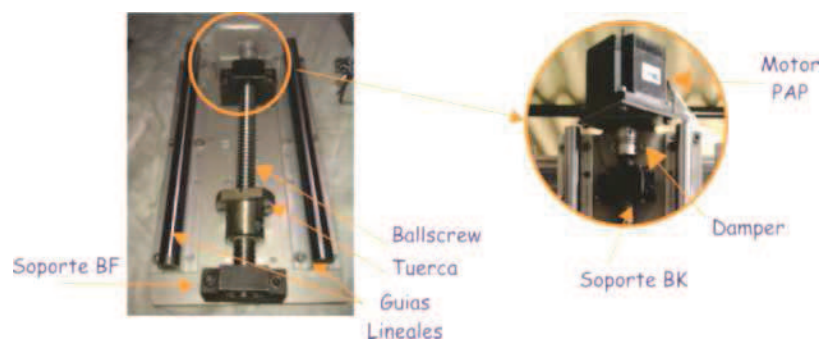


Figura 1.43 Carro primario eje Z.



El carro primario del eje Z de la Figura 1.44, el cual debe ser anclado al sistema de movimiento del eje Y, mediante los rodamientos lineales.

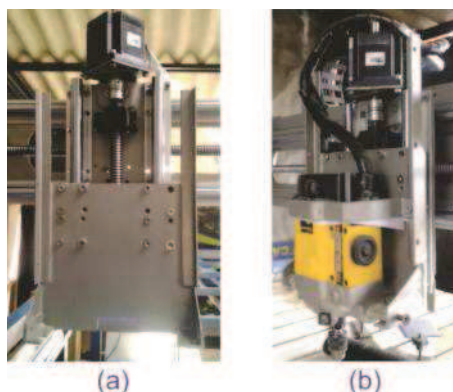


Figura 1.44 Sistema de movimiento eje Z.

Un segundo bloque va anclado al sistema primario y sirve para sujetar el spindle como lo muestra la Figura 1.44 (a). Una vez realizado todos los ajustes y comprobado la perpendicularidad del carro del eje Z con el eje X, Y, se procede a sujetar y fijar el spindle como se puede apreciar en la Figura 1.44 (b).



Figura 1.45 Sistema mecánico implementado.

## CAPÍTULO II

### ENLACE DE LOS SISTEMAS CAD – CAM – CNC

#### 2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MECANIZADO

El proceso de mecanizado tiene como objetivo transformar la materia prima de entrada en un producto de valor agregado de salida. Como indica la Figura 2.1.

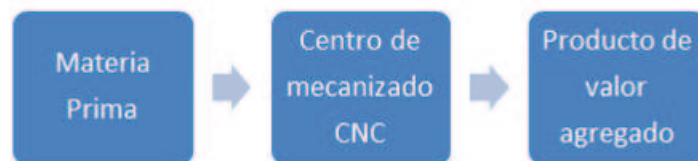


Figura 2.1 Proceso de manufactura.

En el proceso de transformación de la materia prima realizado por el centro de mecanizado CNC, se encuentran sub-procesos que se encargan de ejecutar tareas específicas para en conjunto cumplir el objetivo principal “Realizar el mecanizado”, la Figura 2.2 ilustra la red del proceso.



Figura 2.2 Red proceso – subprocesos de un centro de mecanizado CNC.



Figura 2.3 Ilustración del proceso para realizar el mecanizado CNC.

## 2.1.1 MODELO DE OPERACIÓN FUNCIONAL

Para el análisis de cada uno de los elementos que interactúan en un Centro de Mecanizado CNC, se realiza el modelo de operación funcional de la Figura 2.5, los elementos se los describe a continuación:

### 2.1.1.1 Propósito

El propósito es el maquinado, que constituyen la acción realizada sobre la materia prima para darle valor agregado.

### 2.1.1.2 Metas y objetivos

Son las resultantes de cada una de las etapas, así se tiene:

#### 2.1.1.2.1 Archivo vectorizado

Obtener un archivo vectorizado consiste en convertir una de imagen formada por píxeles, en una formada por vectores, en donde los contornos de la imagen son formados por curvas Bézier, llamadas así en honor a su desarrollador. Un archivo vectorizado tiene contornos perfectamente definidos, pueden ampliarse o reducirse a cualquier tamaño sin que se modifique su calidad o resolución.

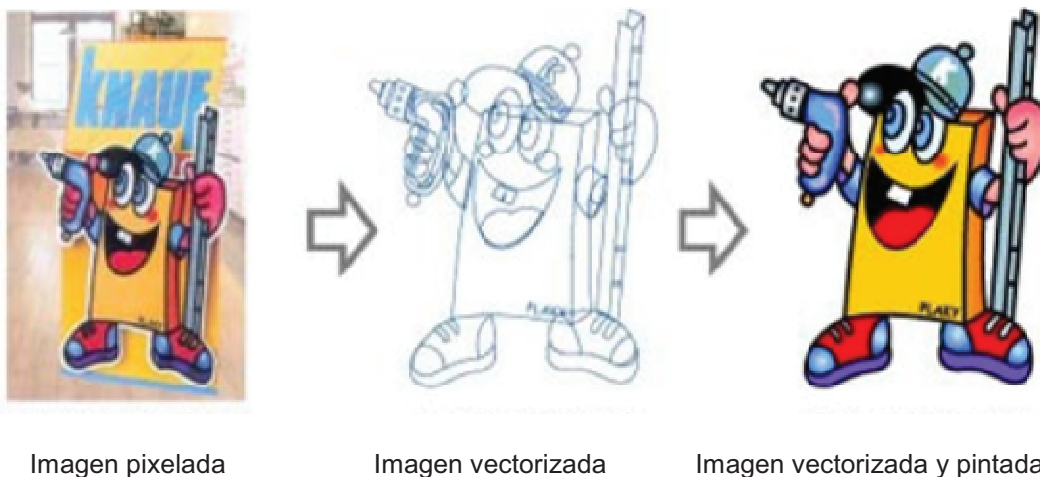


Figura 2.4 Proceso de vectorización.

#### 2.1.1.2.2 Instrucciones en código G

Es el proceso de obtener el código numérico de la posición de cada uno de los puntos que conforman la trayectoria a seguir interpretando la imagen vectorizada. Para este propósito se aplican los sistemas CAM – CAE más un post procesador propio de cada sistema CNC.

### 2.1.1.2.3 Señales de control

Las señales de control son encargadas de activar los drivers para mover los motores paso a paso de acuerdo a la trayectoria indicada en el código G, además se envía señales de control de proceso (inicio, pausa, parada) y de seguridad de operación.

### 2.1.1.2.4 Mecanizado

Consiste en la ejecución de las instrucciones de control por parte de los actuadores sobre la materia prima.

### 2.1.1.3 Funciones

Son herramientas para alcanzar objetivo, se pueden dividir en:

- Software
- Hardware electrónico y mecánico

El hardware mecánico fue descrito en el capítulo 1, mientras que el hardware electrónico se lo describirá en el capítulo 3. El software se lo describe en la sección 2.2 de este capítulo.

### 2.1.1.4 Componentes

Son los elementos que conforman el sistema de mecanizado CNC, los mismos que son tratados dentro de cada una de las funciones.

A más de los descritos se tiene el componente humano fundamental en el desarrollo de este sistema, el cual fue descrito en el capítulo 1, sección 1.4.3.

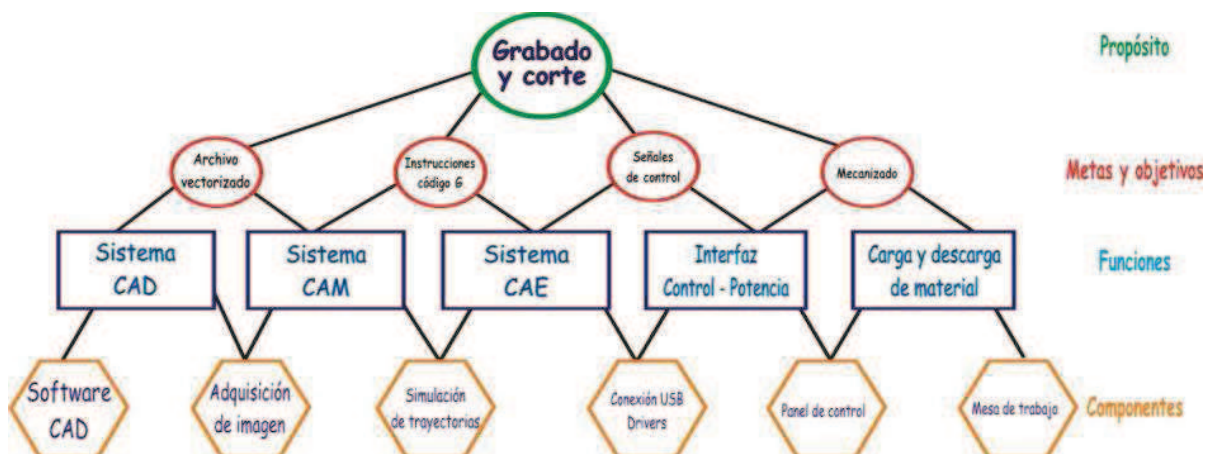


Figura 2.5 Modelo de operación funcional CNC.

## **2.2 SISTEMAS CAD – CAM**

Esta sección describe el Diseño Asistido por Computador (CAD, Computer Aided Design) y la Manufactura Asistida por Computador (CAM, Computer Aided Manufacturing), indicando la correlación entre ellos y su aplicación.

### **2.2.1 DESARROLLO DEL CAD- CAM**

Los sistemas CAD se desarrollaron primero y sirvieron de base para los sistemas CAM, a continuación se presenta un resumen cronológico.

- En 1957. Douglas T. Rosse del MIT desarrollo el sistema APT (Automatic Programmed Tooling) “Herramienta Automática Programada”, sirviendo de fundamento para la programación de la geometría y parámetros de maquinado.
- En la década de los 60’s se crea el CAD en MIT por Ivan Sutherland.
- En la década de los 70’s la NASA integra la tecnología CAM a la CAD.
- En los años 80 e inicios de los 90 se dieron grandes avances en la aplicación de los sistemas CAD/CAM, principalmente por el desarrollo informático.

En la actualidad los sistemas CAD / CAM son diseñados para automatizar funciones manuales, semiautomáticas, peligrosas o donde el grado de precisión es muy alto.

La implementación de sistemas CAD / CAM se ve limitada por el factor económico, depende de cuánto de tecnología se necesitará en el mecanizado. Por ejemplo si el mecanizado se realiza de una solo figura geométrica con muy pocos cambios se implementa un CAD simple, cuando se tiene varios modelos de maquinado que van cambiando en el tiempo entonces se requiere de un CAD/CAM avanzado.

### **2.2.2 APLICACIONES DE LOS SISTEMAS CAD / CAM [20],[21]**

La función principal del CAD, es la de diagramar, dibujar en forma de vectores el proyecto a mecanizar. Las herramientas que poseen van desde el modelado



geométrico hasta aplicaciones desarrolladas específicamente para el análisis u optimización de un producto o prototipo.

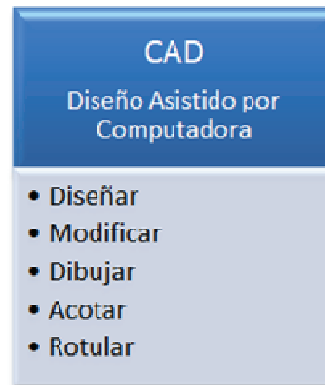


Figura 2.6 Funciones del CAD.

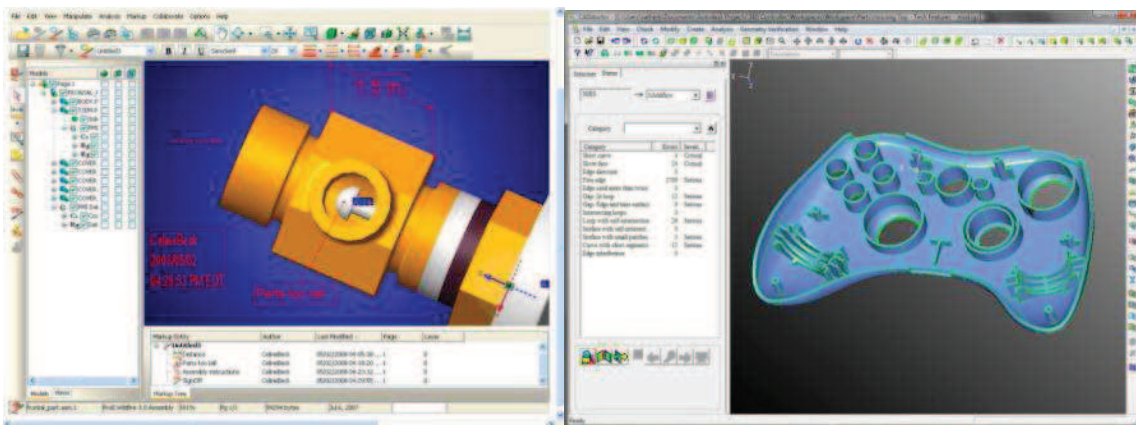


Figura 2.7 Capturas de Pantalla de Software CAD.



Figura 2.8 Ejemplos de Software CAD.

El programa de mecanizado se lo obtiene por medio de los sistemas CAM, los cuales toma información del diseño gráfico "CAD" y genera instrucciones de los movimientos que debe seguir la herramienta o spindle para fabricar la pieza deseada.

CAM  
Manufactura Asistida  
por Computadora

- Simulación de Trayectorias de Corte.
- Generación de Programas de CNC.
- Transferencia de programas de CNC.
- Selección de Herramientas para el maquinado.
- Selección de resolución del mecanizado.
- Selección del tipo de materia prima.

Figura 2.9 Funciones del CAM.

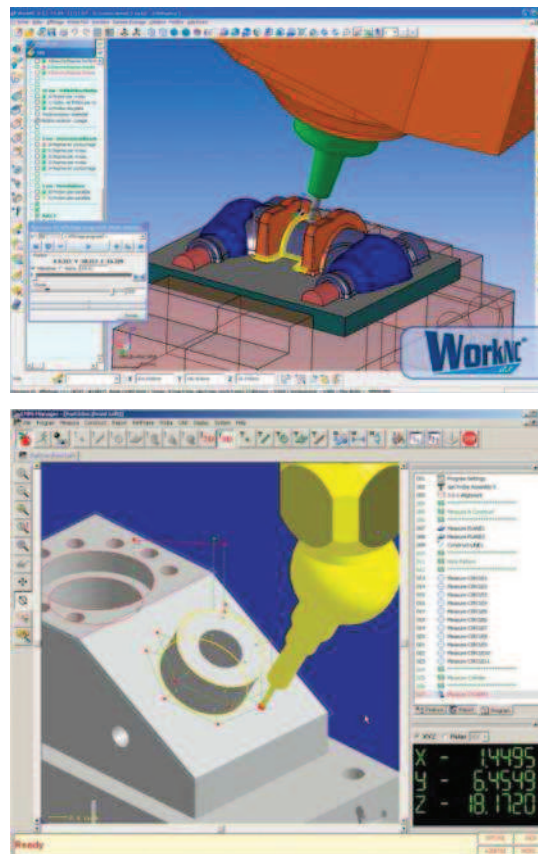


Figura 2.10 Capturas de Pantalla de Software CAM.



Figura 2.11 Ejemplos de Software CAM.

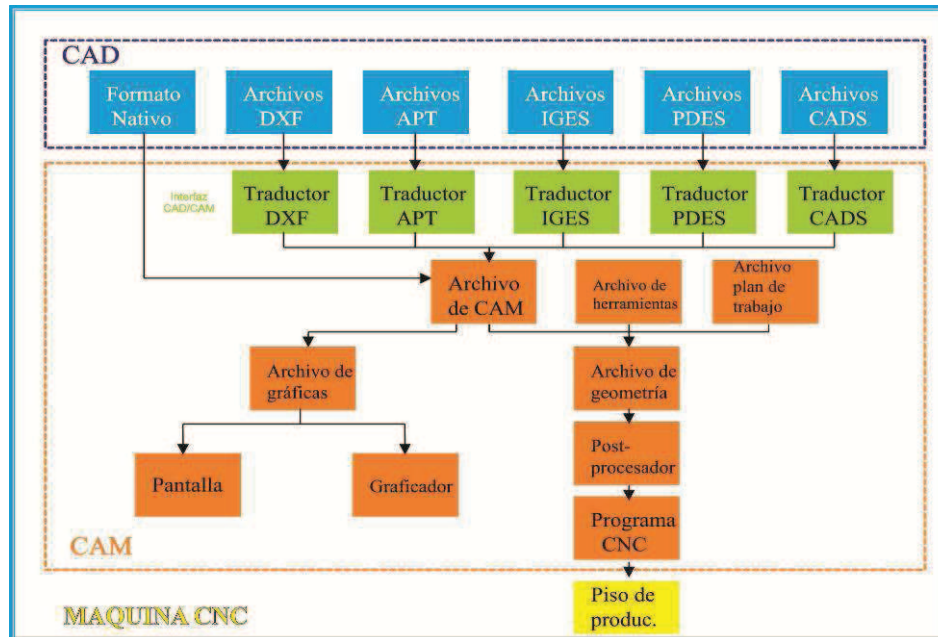


Figura 2.12 Esquema de un sistema CAD/CAM.

## 2.3 TÉCNICAS DE PROGRAMACIÓN CNC [22]

### 2.3.1 PROGRAMACIÓN MANUAL

Consiste en ingresar instrucciones que llevan a la herramienta de mecanización de un punto a otro punto, básicamente se ingresa las coordenadas de cada elemento que conforma la trayectoria a seguir, es un método económico y relativamente fácil, sin embargo toma mucho tiempo generar el código completo y es susceptible de errores.

Es usada cuando se mecaniza un solo modelo o existen pocos cambios en el mismo, está limitada a figuras geométricas básicas. Por estas razones en la industria con grandes volúmenes de producción y flexibilidad no es aplicable, no obstante es una habilidad que todo programador de CNC debe dominar, esto le permite supervisar, controlar y corregir errores antes y durante la mecanización. Para lo cual es importante conocer el lenguaje y las normas bajo el cual se desarrolla el código G de cada máquina, este tema se amplía en la sección 2.7.

### 2.3.2 PROGRAMACIÓN CONVERSACIONAL

La programación conversacional ha ido ganando popularidad en la maquinaria CNC debido a la implementación de HMI más amigables con el programador, las

instrucciones de maquinado son ingresadas directamente en la máquina CNC por el programador de acuerdo a las instrucciones con las que la máquina responde , las principales ventajas son:

- Usar lenguaje de alto nivel, para describir de forma estándar la geometría de una figura, lo cual simplifica el proceso de definición de los movimientos que sigue la herramienta de mecanizado.
- Realizar simulaciones antes de ejecutar el proceso de mecanizado.

### **2.3.3 PROGRAMACIÓN USANDO SISTEMAS DE CAD/CAM**

Esta técnica es la más utilizada para el mecanizado a nivel industrial con altos niveles de producción, calidad y eficiencia.

La integración CAD/CAM en una sola interfaz amigable hombre - máquina que da como resultado representaciones exactas de la pieza a mecanizar, la capacidad de simular el código generado y estimación de tiempo de ejecución, entre las más importantes.

Todo el proceso de diseño se realiza en un mismo equipo por lo que no es necesario hacer transferencia de datos, se tiene la posibilidad de grabar datos geométricos, de manufactura de una gran cantidad de piezas y se puede generar perfiles para cada tipo de material, herramienta o velocidad de mecanizado.

Los programas CAM y CAD varían entre sus distintos desarrolladores y comercializadores, por la cantidad de herramientas, el tipo de interfaz gráfica, requerimientos del sistema, forma de operación y compatibilidad con el post procesador.

Existen tres pasos fundamentales para realizar el proceso de diseño y mecanizado.

1. El programador da información general al sistema, en esta etapa interviene el diseño gráfico de la pieza a mecanizar.
2. Se define la geometría de la pieza de trabajo, dimensión, número de ejes, resolución de las curvas, etc.
3. Se define la operación de maquinado (corte o grabado), velocidad de avance, área máxima de corte, tipo de material y tipo de herramienta.

## 2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS CAD/CAM

Los sistemas CAD/ CAM se clasifican según la Figura 2.13, por el tipo de herramienta al cual es aplicado, por los grados de libertad y por la forma en que se realiza el proceso de maquinado.

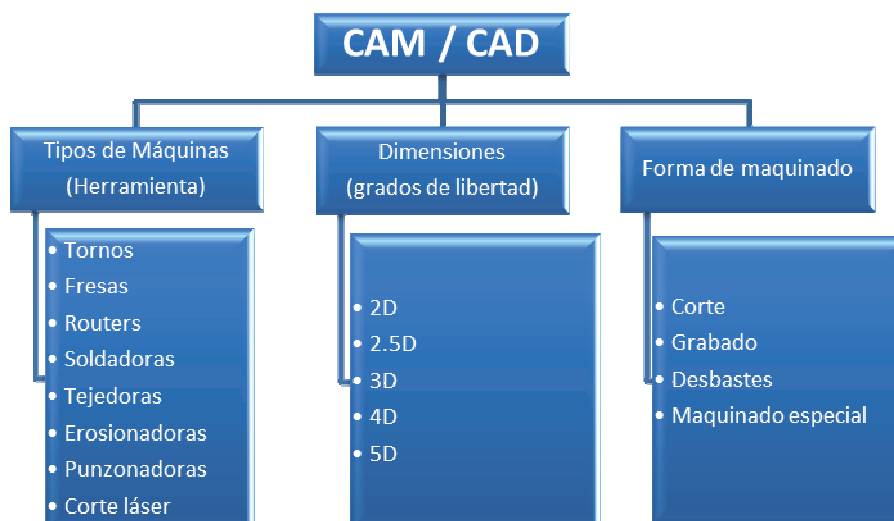


Figura 2.13 Clasificación de los sistemas CAD/CAM.

## 2.5 SOFTWARE CAD/CAM

Existe varios software CAD - CAM en el mercado, para diferentes tareas y presupuestos, con características propias que los distinguen de los demás, como por ejemplo los grados de libertad que pueden manejar, el tipo de control, el número de herramientas adicionales que puede programar, la posibilidad de visualización y simulación, características que inciden en el costo, el cual puede variar desde unos cuantos cientos de dólares a los miles de dólares.

Algunos software comerciales CAD/CAM son:

- |               |             |           |
|---------------|-------------|-----------|
| * Unigraphics | *Edgecam    | * WorkNc  |
| * Vericut     | *Solidworks | * Camlink |
| * XCam        | * Surfcam   | * GMS     |
| * Hypermill   | * Camworks  | * MazaCam |

## 2.6 POST PROCESADORES

Un sistema CAD/CAM es la interfaz entre el diseñador y el programa a mecanizar, realiza funciones como: cálculos trigonométricos, elaborar código de instrucciones de desplazamiento de todos los ejes para alcanzar la trayectoria deseada, definir velocidades de corte, taladrado y movimiento tanto de los ejes como spindle, también de acuerdo a las características del software genera instrucciones para el accionamiento del cambio de herramienta, cambio de piezas, refrigerante, aspirado, sensores.

Sin embargo la interfaz entre el software y la máquina CNC no la realiza el software CAD / CAM, por lo que se requiere de un programa adicional diseñado para cada tipo de máquina que transforme las instrucciones, en un código que pueda entender y ejecutar, el cual es conocido como post procesador que es propio de cada controladora CNC que se comercializa o diseña.

Las controladoras son diseñadas bajo normas reconocidas internacionalmente, las principales son:

- *ISO 6983 Normas de simulación y mecanizado ISO.*
- *EIA RS274 Generación de programa de maquinado.*
- *RS274NGC Interprete CNC*

Se estudia a profundidad la RS274NGC por ser la norma en la que se basa el software de control de la máquina CNC implementada en este proyecto de titulación.

## 2.7 ESTRUCTURA DE UN PROGRAMA CNC

La generación del código G e interpretación por parte del post procesador se hace de manera automática dentro de la interfaz de CNCUSB, sin embargo es importante conocer los fundamentos del código a fin de detectar fallas y problemas durante el tiempo de ejecución que pudieran existir o para poder editar programas de maquinado generados desde un post procesador diferente.

El conjunto de instrucciones de la trayectoria a seguir están dadas en un lenguaje conocido como código "G" el cual es interpretado por el Post procesador de CNCUSB Mk2\_Controller, el criterio de selección se lo estudia en el capítulo 3.

### **2.7.1 RESUMEN LENGUAJE RS274 / NGC [23]**

El lenguaje RS274/NGC se basa en líneas o bloques de código, para controlar un centro de mecanizado con varias funciones diferentes. Al conjunto de líneas de código se le conoce como archivo de programa CNC. Una línea típica de código consiste en un número de línea opcional al comienzo seguida de una o más "Palabras". Por ejemplo, "G1 X3" es una línea válida de código con dos palabras. "G1" es un comando que indica moverse en línea recta a la velocidad de avance programada y X3 proporciona un valor de argumento (el valor de X debe ser de 3 al final del movimiento). La mayoría de los comandos inician con G o M.

El lenguaje RS274/NGC no tiene indicador para el inicio de un programa por lo que el post procesador debe encargarse de procesar dicho archivo. Un programa puede estar en un solo archivo o en varios archivos.

#### **2.7.1.1 Formato de una línea**

Una línea permisible de código tiene un máximo de 256 caracteres, los elementos son:

1. Indicador de bloque, slash "/", es opcional.
2. Número de línea es opcional.
3. Número de palabras, ajustes de parámetros y comentarios ilimitados.
4. Marcador de fin de línea.

Cualquier entrada no permitida es ilegal y hará que el post procesador indique un error.

#### **2.7.1.2 Número de línea**

El número de línea es la letra N seguida de un número entero sin signo entre 0 y 99999. Los números de línea se pueden repetir, puede no estar en orden u omitir, aunque en la práctica no es un buen consejo de programación.

#### **2.7.1.3 Palabra**

Una palabra es una letra que no sea N seguida de un valor real. Las palabras comienzan con cualquiera de las letras que se muestran a continuación: A, B, C, D, F, G, H, I, J, K, L, M, P, Q, R, S, T, X, Y, Z.



#### 2.7.1.4 Número

Es un valor real resultado de la recopilación de caracteres que procesan para llegar a un número. Un valor real es un número explícito (como 341 o -0,8807 por ejemplo), un valor de parámetro, una expresión o un valor de operación unitaria, pueden ser enteros y decimales.

#### 2.7.1.5 Parámetros

Un valor de parámetro es el símbolo numeral "#", seguido de un valor real que se evalúa como entero entre 1 y 5399. El carácter # tiene prioridad sobre las demás operaciones.

#### 2.7.1.6 Expresiones y operaciones binarias

Una expresión es un conjunto de caracteres que comienza con un corchete izquierdo “[” y terminan con un derecho “]”, puede contener números, valores de parámetros, operaciones matemáticas y otras expresiones. Se definen nueve operaciones, cuatro operaciones matemáticas básicas: suma (+), resta (-), multiplicación (\*) y división (/). Tres operaciones lógicas: no exclusiva o (OR), exclusivo o (XOR), lógica Y (AND), la octava operación es de módulo (MOD) y la novena es el "potencia" de la operación (\*\*).

Las operaciones binarias se dividen en tres grupos. El primer grupo es: potencia. El segundo grupo es: multiplicación, división y módulo. El tercer grupo es: suma, resta, lógico o no exclusiva, lógica o exclusiva, y lógica and.

#### 2.7.1.7 Comentarios y mensajes

Son caracteres imprimibles y espacios en blanco, inician con un paréntesis izquierdo y terminan con un derecho.

#### 2.7.1.8 Modales

Los Comandos modales se dividen en "grupos modales", un sólo miembro de un grupo modal puede ejecutarse a la vez.

**Grupo 1 = {G0, G1, G2, G3, G38.2, G80, G81, G82, G83, G84, G85, G86, G87, G88, G89} Movimiento.**

**Grupo 2 = {G17, G18, G19} Selección del plano.**

**Grupo 3 = {G90, G91} Modalidad a distancia.**

**Grupo 5 = {G93, G94} Modo de velocidad de alimentación.**



- Grupo 6** = {G20, G21} **Unidades.**
- Grupo 7** = {G40, G41, G42} **Corrección del radio de corte.**
- Grupo 8** = {G43, G49} **Herramienta de corrección de longitud.**
- Grupo 10** = {G98, G99} **Modo de retorno en los ciclos fijos.**
- Grupo 12** = {G54, G55, G56, G57, G58, G59, G59.1, G59.2, G59.3}  
**Selección del sistema de coordenadas.**
- Grupo 13** = {G61, G61.1, G64} **Modo de control** .

Los grupos modales de los códigos M son:

- Grupo 4** = {M0, M1, M2, M30, M60} **Parar.**
- Grupo 6** = M6 **Cambio de herramienta**
- Grupo 7** = {M3, M4, M5} **Giro del spindle.**
- Grupo 8** = {M7, M8, M9} **Refrigerante**

M7 y M8 pueden estar activas al mismo tiempo.

**Grupo 9** = {M48, M49} **activar / desactivar la velocidad de mecanizado**

Además de los grupos modales anteriores, existe un grupo de no modales códigos G:

**Grupo 0** = {G4, G10, G28, G30, G53, G92, G92.1, G92.2, G92.3}

### 2.7.2 CÓDIGO G [23]

El código G desarrollado bajo la norma RS274/NGC se muestran y describen a continuación.

#### 2.7.2.1 G00 - Posicionamiento rápido

Se emplea para el movimiento lineal rápido, lo cual produce un movimiento lineal al punto de destino en la actual velocidad de avance, el mecanizado no se realiza cuando un comando G0 se está ejecutando.

#### 2.7.2.2 G01 - Interpolación lineal

Se emplea para el movimiento lineal a la velocidad de corte o grabado ya sea para mecanizar o desplazarse dentro de los límites de la mesa de trabajo.

### 2.7.2.3 Interpolación helicoidal (CW) y G03 Interpolación helicoidal (CCW)

Se genera un arco G2 (arco en sentido horario CW) ó G3 (arco en sentido anti horario CCW).

El número de R es el radio. Un radio positivo indica que el arco se convierte a través 180 grados o menos, mientras que un radio negativo indica un giro de 180 grados a 359,999 grados.

### 2.7.2.4 G04 – Pausa

Mantiene inmóviles los ejes durante el período de tiempo (P) en segundos.

### 2.7.2.5 G10 L9 – Configuración de parámetros sin movimiento

Ejemplos:

**G10** Fija la posición actual como origen.

**G17** Selecciona el plano XY.

**G18** Selecciona el plano XZ.

**G19** Selecciona el plano YZ.

**G17** Selecciona el plano XY.

**G18** Selecciona el plano XZ.

**G19** Selecciona el plano YZ.

**G20** Selecciona como sistema de unidades las pulgadas.

**G21** Selecciona como sistema de unidades los milímetros.

**G20** o **G21** Van siempre al inicio de un programa antes de cualquier movimiento

**G28** Mueve la referencia del software del sistema hasta alcanzar el origen1.

**G30** Mueve la referencia del software del sistema hasta alcanzar el origen2.

### 2.7.2.6 Códigos M

- **M0** Stop, detiene un programa en ejecución temporalmente (independientemente de la configuración del interruptor de parada opcional).
- **M1** STOP opcional, detiene un programa en ejecución temporalmente (pero sólo si el interruptor de parada opcional está conectado).

- **M2** Fin del programa o para finalizar las tareas de mecanizado.
- **M30** Fin de programa, Reset.
- **M3** Activa el giro en sentido horario del spindle.
- **M4** Activa el giro en sentido anti horario del spindle.
- **M5** Stop del spindle (herramienta de mecanizado).
- **M6** Cambio de Herramienta.
- **M7** Acciona el Refrigerante de nebulización.
- **M8** Acciona el Refrigerante de inundación.
- **M9** Refrigerante de nebulización e inundación apagados.
- **M48** Habilita velocidad de avance y retroceso.
- **M49** Desactivar velocidad de avance y retroceso.
- **M62, M63, M64, M65** Salidas programable por el usuario.

#### 2.7.2.7 Otros códigos

- **F** Set velocidad de avance en el mecanizado.
- **S** Set Velocidad del Spindle en RPM.
- **T** Selección del número de herramienta.

#### 2.7.2.8 Ejemplos

##### 2.7.2.8.1 Mecanizado de un cuadrado, lado de 150mm y profundidad de 3mm.

```

1: % M3
2: G01 X0 Y0
3: G01 Z -3
4: G01 Z 3
5: G01 X -150 Y -150
6: G01 Z -3
7: G01 X 150 Y -150
8: G01 X 150 Y 150
9: G01 X -150 Y 150
10: G01 X -150 Y -150
11: G01 Z 3
12: G01 X0 Y0
13: M5
14: %

```

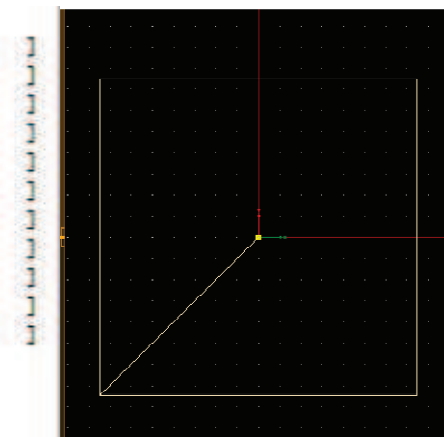


Figura 2.14 Cuadrado en código RS274 y simulación.

### Descripción del mecanizado del cuadrado de la Figura 2.13:

1. **%M3** Inicia el programa y hace girar el husillo en sentido horario.
2. **G01** Mueve el sistema a las coordenadas XY a  $X = 0, Y = 0$ .
3. **G01** Mueve el eje Z a  $Z = -3$ . Origen de Z.
4. **G01** Mueve el eje Z a  $Z = 3$ . Una altura para poder moverse sin sufrir colisiones.
5. **G01** Mueve el sistema a las coordenadas XY a  $X = -150, Y = -150$  (primera arista del cuadrado).
6. **G01** Mueve el eje Z a  $Z = -3$ . Origen de Z.
7. **G01** Mueve el sistema a las coordenadas XY de  $X = -150, Y = -150$  a  $X = 150, Y = -150$ , es decir solo se desplaza el eje X. (segunda arista).
8. **G01** Mueve el sistema a las coordenadas XY de  $X = 150, Y = -150$  a  $X = 150, Y = 150$ , es decir solo se desplaza el eje Y. (tercera arista).
9. **G01** Mueve el sistema a las coordenadas XY de  $X = 150, Y = 150$  a  $X = -150, Y = 150$ , es decir solo se desplaza el eje X. (cuarta arista).
10. **G01** Mueve el sistema a las coordenadas XY de  $X = -150, Y = 150$  a  $X = -150, Y = -150$ , es decir solo se desplaza el eje Y. (primera arista).
11. **G01** Mueve el eje Z a  $Z = 3$ . Una altura para poder moverse sin sufrir colisiones.
12. **G01** Mueve el sistema a las coordenadas XY de  $X = -150, Y = -150$  a  $X = 0, Y = 0$ , regresa a el origen.
13. **M5** Apaga el Spindle.
14. **%** Termina el programa.

El programa se llevó a cabo bajo el modal G0, 1 es decir con interpolación lineal, moviendo al spindle de la posición inicial a 3 milímetros de profundidad de manera que este bajo el plano  $Z = 0$  cuando se encuentre dentro de la trayectoria a mecanizar y se eleve una altura de seguridad 3 milímetros sobre el plano  $Z = 0$ , cuando este fuera de ella.

2.7.2.8.2 Mecanizado *circunferencia de radio = 150mm profundidad de 3mm.*

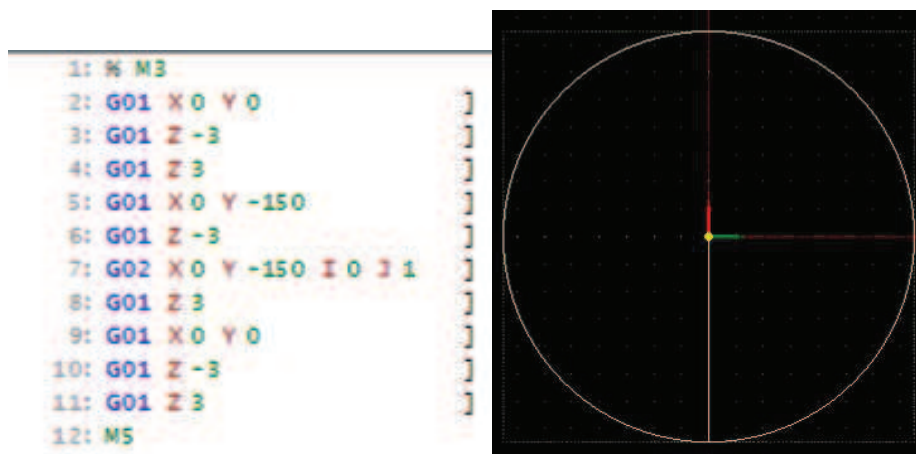


Figura 2.15 Círculo en código RS274 y simulación.

**Descripción del mecanizado de la circunferencia de la Figura 2.15:**

1. **%M3** Inicia el programa y hace girar el husillo en sentido horario.
2. **G01** Mueve el sistema a las coordenadas XY a  $X = 0, Y = 0$ . (origen)
3. **G01** Mueve el eje Z a  $Z = -3$ . Origen de Z.
4. **G01** Mueve el eje Z a  $Z = 3$ . Una altura para poder moverse sin sufrir colisiones.
5. **G01** Mueve el sistema a las coordenadas XY a  $X = -0, Y = -150$ .
6. **G01** Mueve el eje Z a  $Z = -3$ . Origen de Z.
7. **G02 y I=0 y J=1** Mueve los ejes Y e X en forma horaria describiendo una circunferencia de radio = 150mm.
8. **G01** Mueve el eje Z a  $Z = 3$ . Una altura para poder moverse sin sufrir colisiones.
9. **G01** Mueve el sistema a las coordenadas XY de  $X = 0, Y = -150$  a  $X = 0, Y = 0$ , regresa a el origen.
10. **G01** Mueve el eje Z a  $Z = -3$ . Origen de Z.
11. **G01** Mueve el eje Z a  $Z = 3$ . Una altura para poder moverse sin sufrir colisiones.
12. **M5** Apaga el Spindle.

Como se puede observar el programa se llevó a cabo bajo el comando G01 es decir con interpolación lineal para llevar el spindle del origen del sistema al origen del mecanizado, para realizar circunferencia se lo hace bajo una sola instrucción

G02 mediante interpolación circular, el spindle trabaja de manera que este abaja cuando se encuentre dentro de la trayectoria y se eleve una altura de seguridad cuando este fuera de ella.

## **2.8 PROCESO DE VECTORIZACIÓN Y GENERACIÓN DE CÓDIGO G MEDIANTE CORELDRAW Y CNCUSB CONTROLLER**

### **2.8.1 PROCESO DE VECTORIZACIÓN MEDIANTE CORELDRAW**

#### **2.8.1.1 Descripción de CorelDraw**

CorelDRAW es un software de diseño gráfico de manejo vectorial, el principal producto CorelDRAW Graphics Suite, cuenta con múltiples herramientas para dibujo, la maquetación, diagramación de páginas para impresión y/o la publicación web [24].

Tuvo sus orígenes en 1989 con la versión 1.0 siendo la primera aplicación de diseño para Windows en ser comercializada, actualmente se encuentra en su versión CorelDRAW X16, lanzada el 12 de marzo del 2012.

Los principales formatos soportados para la importación y exportación son:

- AI - Adobe Illustrator.
- BMP - Mapa de bits Windows.
- CDR - CorelDraw.
- CPT - Imagen Corel PHOTO-PAINT.
- DOC, DOCX - MS Word.
- DWG - AutoCAD.
- DXF - AutoCAD.
- EPS - PostScript encapsulado.
- GIF - Animación GIF.
- JPG - Mapa de bits JPEG.
- PLT - Archivo de trazador HPGL.
- PNG - Portable Network Graphics.

- PP4 - Picture Publisher 4.
- PPT - Microsoft PowerPoint.
- PS, EPS, PRN - PostScript.
- PSD - Adobe Photoshop.
- TIF - Mapa de bits TIFF.
- TXT - Texto ANSI.



Figura 2.16 Logotipo de CorelDRAW, tomado de [24].

### 2.8.1.2 Ventanas y herramientas [25]

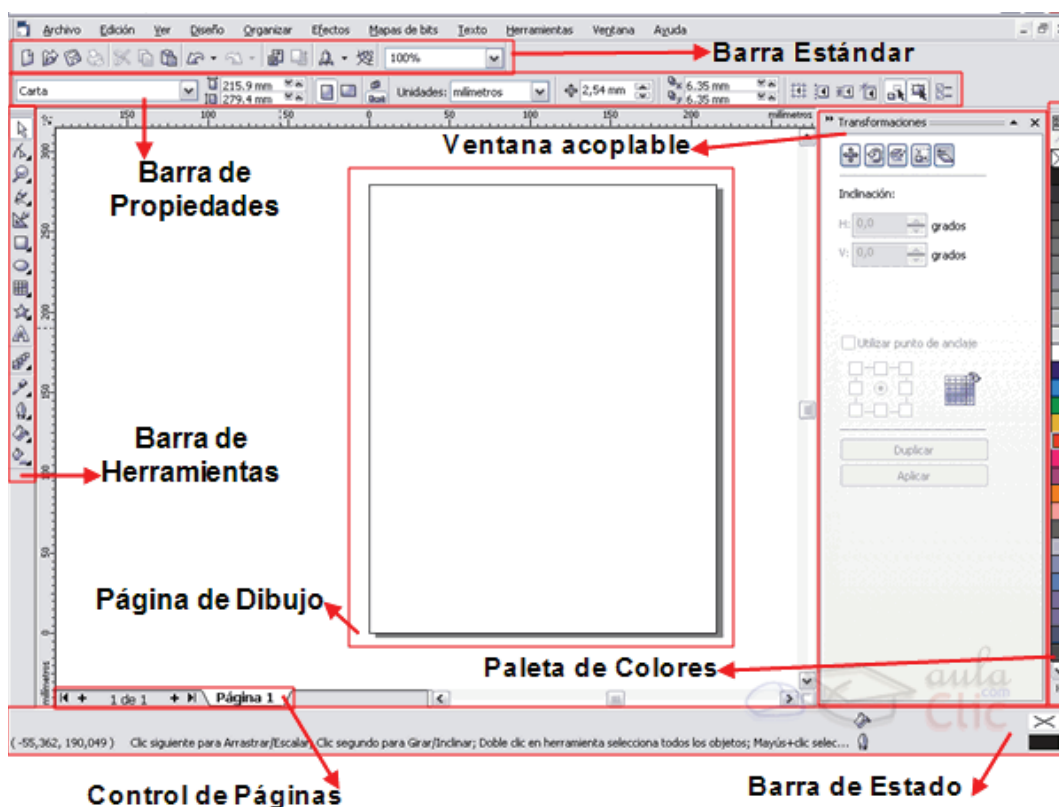


Figura 2.17 Ventana principal

### 2.8.1.2.1 Barra estándar

Permite abrir, cerrar, guardar, imprimir, editar y exportar archivos, además se tiene funciones para modificar las propiedades del documento.

### 2.8.1.2.2 Barra de herramientas

Contiene herramientas para formas geométricas, lupa, texto, transformaciones, rellenos, líneas, formas básicas preestablecidas.

Dentro de esta barra hay sub menús desplegables que son nuevas opciones accesibles a través de una de la barra de herramientas, esto se indica por una pestaña negra ubicada en la parte inferior.

Las funciones de la caja de herramientas se muestran en la Figura 2.18.

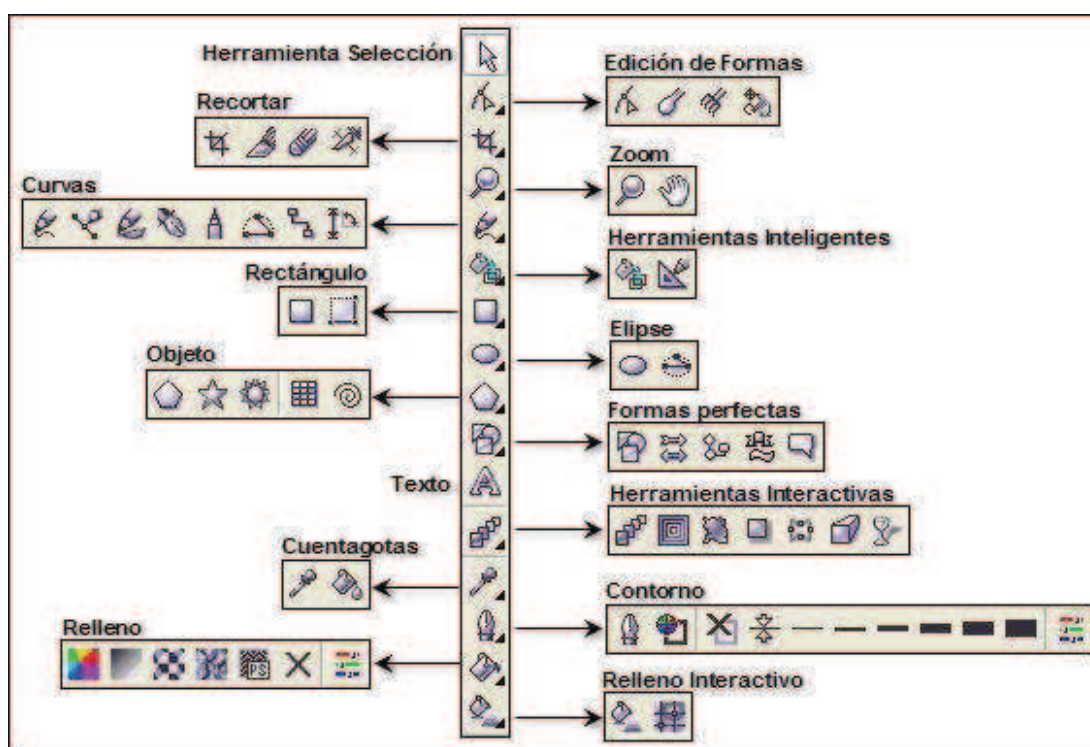


Figura 2.18 Barra completa de herramientas.

Todas estas son las herramientas básicas que se necesitan para poder vectorizar una imagen.

### 2.8.1.2.3 Paleta de colores

Muestra la gama de colores sólidos disponibles en CMYK, RGB, LAB y pantones preestablecidos.



#### 2.8.1.2.4 Barra acoplable

Es una barra de ayuda que indica las opciones que se tiene al seleccionar una determinada herramienta.

#### 2.8.1.2.5 Control de páginas

Permite navegar en varias páginas cuando se tiene trabajos en forma anidada.

#### 2.8.1.2.6 Barra de estado

Indica el estado del diseño que se está realizando.

#### 2.8.1.2.7 Barra de propiedades

Permite configurar el área de trabajo.

#### 2.8.1.2.8 Pagina de dibujo

Es el área de trabajo, que sirve de referencia para ubicar la mesa de trabajo.

### 2.8.1.3 Ejemplo de vectorización de una imagen JPEG<sup>2</sup>

Se describe a continuación el proceso de vectorización para una imagen JPEG.

**Paso 1:** Abrir CoreIDRAW.

**Paso 2:** Arrastrar la imagen JPEG hacia la pestaña de CoreIDRAW.

**Paso 3:** Presionar F4 para hacer un acercamiento hacia toda la imagen, se puede observar como los contornos son un conjunto de pixeles, por lo que no se encuentran bien definidos, como se muestra en la Figura 2.19.



Figura 2.19 Imagen JPEG pixelada.

<sup>2</sup>JPEG (JointPhotographicExpertsGroup) Es un estándar para la compresión de imágenes.

**Paso 4:** En la barra de herramientas se selecciona el icono de curvas, realizar click en la pestaña para desplegar el sub menú y seleccionar la herramienta de Bézier.

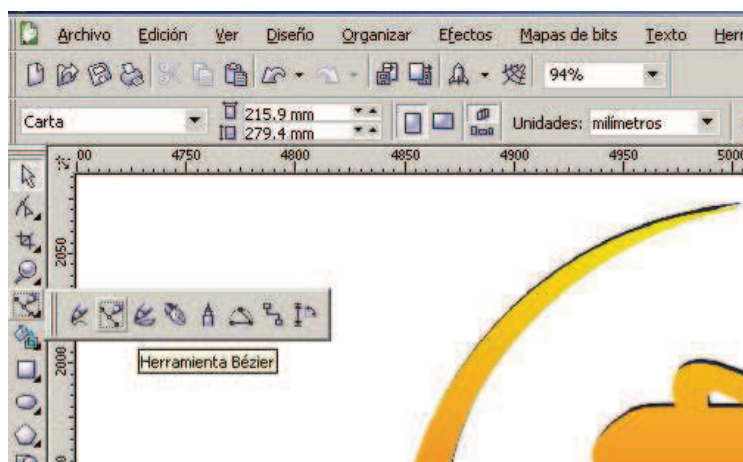


Figura 2.20 Selección de Bézier.

**Paso 5:** Con la herramienta de Bézier seleccionada, se realiza click izquierdo creando un punto en cada una de las aristas imagen, en caso de no existir aristas se hace donde la curva cambia de orientación, al final del proceso se obtiene la Figura 2.21.



Figura 2.21 Polígonos creados sobre la imagen usando el Bézier.

**Paso 6:** Seleccionar un polígono de los creados en el paso 5, luego presionar F10 en propiedades seleccionar la herramienta de todos los nodos y se realiza click (Figura 2.22 a), luego en la misma barra se selecciona la opción de convertir una línea en curvas y realiza click (Figura 2.22 b).



Figura 2.22 (a) Selección de todos los nodos.



Figura 2.22 (b) Convertir línea en curva.

**Paso 7:** Se presiona F10 y en la mitad de cada línea se realiza click derecho y se lleva la línea hacia el contorno de la imagen, se sigue el mismo procedimiento hasta tener todas las líneas sobre los contornos de la imagen, como resultado se obtiene la Figura 2.23



Figura 2.23 Líneas sobre todos los contornos de la imagen.

**Paso 8:** Se separa la imagen JPEG y se obtiene la imagen vectorizada.

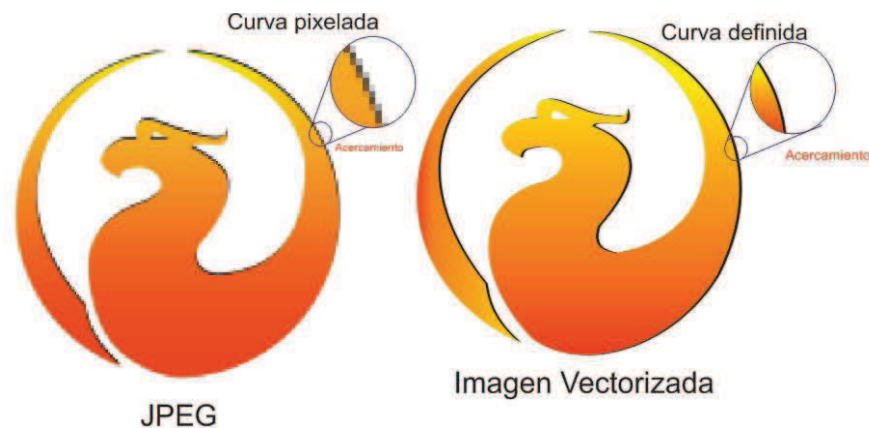


Figura 2.24 Resultado de la vectorización.

Como se puede apreciar en la Figura 2.24, las curvas vectorizadas por Bézier quedan completamente definidas y no se alteran al cambiar su dimensión.

## 2.8.2 EXPORTAR UNA ARCHIVO COMO PLT

Una vez terminado el proceso de vectorización, se lo exporta para generar el código G, los pasos se describen a continuación. Se elige la extensión PLT (HPGL)<sup>3</sup> por ser una de las compatibles con la controladora CNCusb, la lista completa de los archivos soportados se los detalla en el manual [23].

**Paso 1:** Se presiona Ctrl + E, se abre cuadro de exportar donde se selecciona el destino, nombre del archivo a exportar, además el formato de archivo al cual se va a exportar.

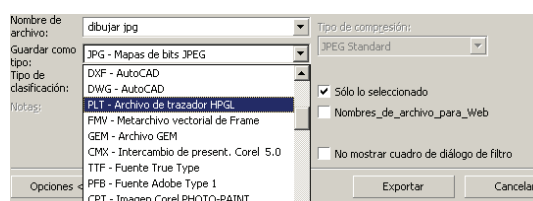


Figura 2.25 Pantalla para exportar.

**Paso2:** Se configuran las opciones de exportación.

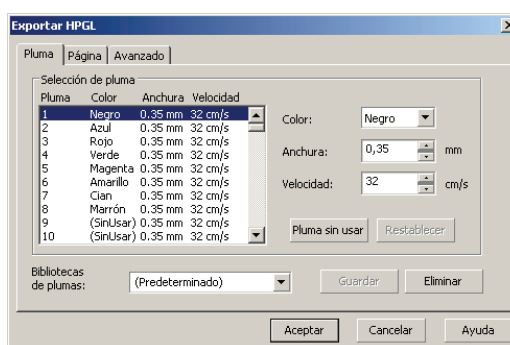


Figura 2.26 Configuración de pluma.

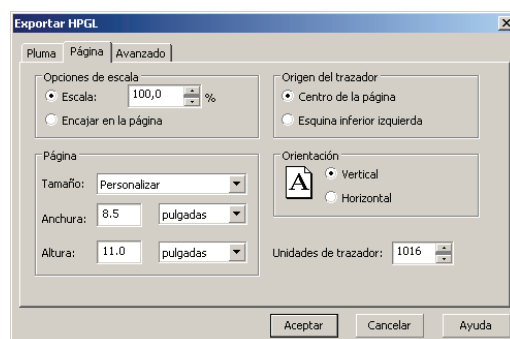


Figura 2.27 Configuración de página.

<sup>3</sup>HPGL (Hewlett & Packard Graphics Language) es en lenguaje de descripción de gráficos.

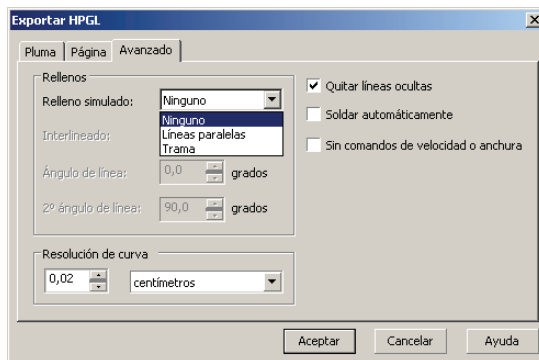


Figura 2.28 Configuración Avanzada.

La configuración se realiza dependiendo del tipo de mecanizado (corte, grabado), se presiona aceptar y el archivo es exportado.

### 2.8.3 IMPORTAR UN ARCHIVO PARA GENERAR EL CÓDIGO G

Para generar el código G, se debe utilizar el Post procesador de la controladora CNC, el cual está incluido en el **HMI ROUTER CNC**, una vez abierta y en la ventana de aplicaciones, buscar el icono CNC y realizar doble click, esperar que se cargue el programa.

**Paso 1:** Realizar click izquierdo en la opción Abrir, buscar el archivo, en este caso con extensión .plt y aceptar.



Figura 2. 29 Importando un archivo.

**Paso 2:** Se configura los parámetros del mecanizado de la Figura 2.30 y realizamos click en OK.

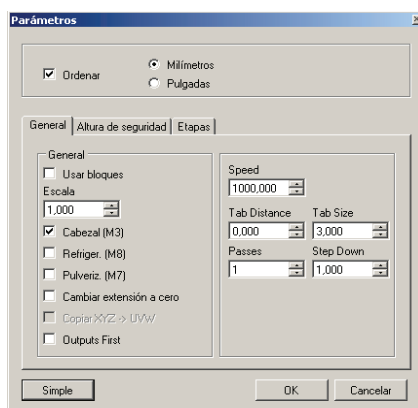
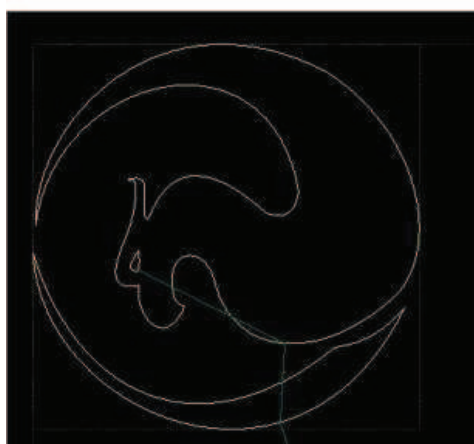


Figura 2. 30 Parámetros del mecanizado.

Los principales parámetros a configurar son:

- Unidades (milímetros o pulgadas).
- Velocidad de mecanización.
- Número de veces que se debe realizar el mecanizado.
- Tipo y forma de activación del spindle, pulverizador y refrigerante.
- Estado al realizar avance rápido.
- Tipo de herramienta.



TRAYECTORIA  
SIMULADA

```

1: M
2: G90 G17 G21
3: F1000.00
4: M03
5: G00 Z 20.0000
6: G00 X5404.1000 Y2674.4000 Z 20.
7: G01 Z 0.0000
8: G01 X5402.5000 Y1661.1000
9: G01 X5401.0250 Y1687.8800
10: G01 X5399.8500 Y1694.6250
11: G01 X5398.4250 Y1708.2000
12: G01 X5396.1750 Y1721.8000
13: G01 X5393.0250 Y1735.3000
14: G01 X5400.9750 Y1748.7000
15: G01 X5403.9750 Y1761.9000
16: G01 X5407.9250 Y1774.6250
17: G01 X5412.8250 Y1787.4500
18: G01 X5418.6250 Y1799.6750
19: G01 X5425.2000 Y1811.4250
20: G01 X5432.6750 Y1822.7000
21: G01 X5440.8500 Y1833.3500
22: G01 X5449.7500 Y1843.3750
23: G01 X5459.2750 Y1852.6750
24: G01 X5469.4250 Y1861.2000
25: G01 X5480.1250 Y1868.8750
26: G01 X5491.3500 Y1875.6500
27: G01 X5503.0250 Y1881.4500
28: G01 X5515.1500 Y1886.2000
29: G01 X5527.6250 Y1889.8500
30: G01 X5531.9750 Y1891.2500
31: G01 X5540.4250 Y1892.3500
32: G01 X5553.3250 Y1893.6000
33: G01 X5562.0500 Y1898.8500
34: G01 X5571.0000 Y1885.6750
35: G01 X5580.3750 Y1881.1250
36: G01 X5590.1750 Y1876.2000
37: G01 X5600.4750 Y1870.9000
38: G01 X5611.2250 Y1865.2250
39: G01 X5622.4750 Y1859.2250
40: G01 X5634.2500 Y1852.8750
41: G01 X5646.5250 Y1846.2000
42: G01 X5659.2750 Y1839.2000
43: G01 X5672.5000 Y1831.8750
44: G01 X5686.2000 Y1824.2750
45: G01 X5700.2500 Y1816.4000
46: G01 X5714.4250 Y1808.2250
47: G01 X5728.7500 Y1799.4000

```

Figura 2. 31 Resultado de la importación.

El resultado de la importación es la generación del código G en un archivo de texto el cual al ser cargado en el software de control, crea la simulación y el programa con la trayectoria de mecanizado.



## CAPÍTULO III

### DISEÑO SISTEMA DE CONTROL

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO

El sistema electrónico está conformado por el computador con los sistemas CAM/CAD/CNC, el cual vía USB transmite y recibe señales a la controladora CNCUSB, está a su vez envía los pulsos de control a los drivers que accionan los motores paso a paso. Además de procesar información del control de proceso, seguridad y del spindle.

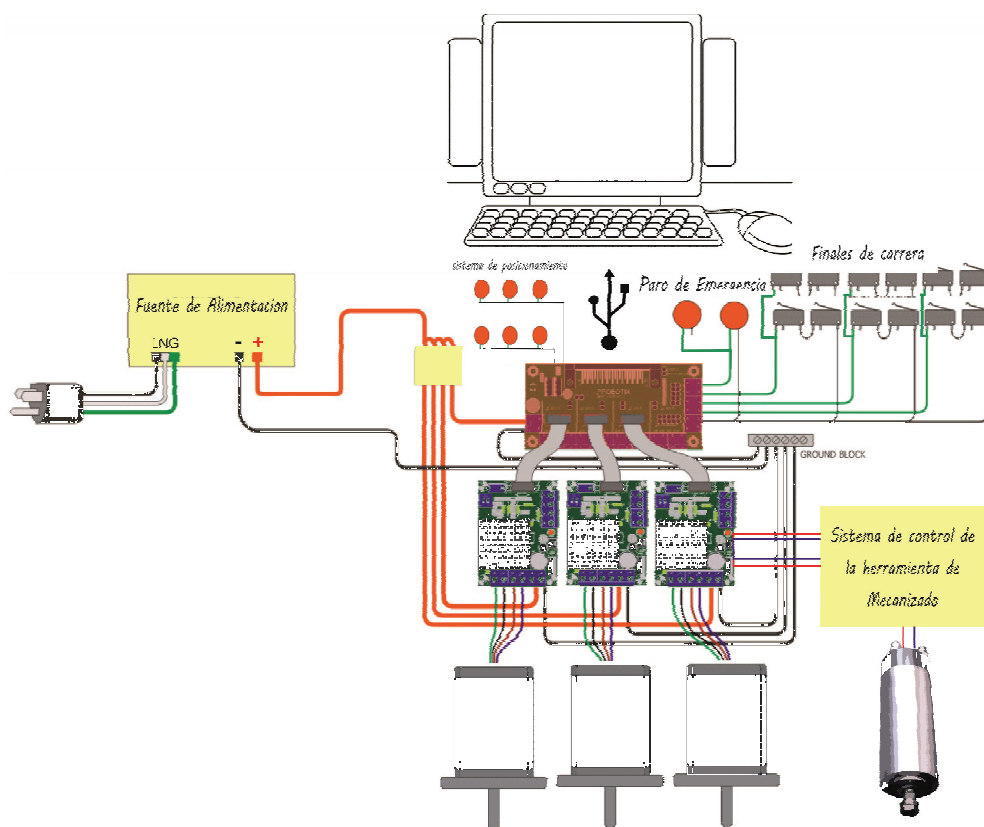


Figura 3.1 Ilustración sistema de control y potencia.

#### 3.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA ELECTRÓNICO

El sistema electrónico interpreta las señales de control entregadas por el computador vía comunicación USB por parte del post procesador para accionar los elementos finales de control, por medio de una etapa de potencia, para de esta manera realizar el mecanizado sobre la materia prima.

El objetivo principal es seguir la trayectoria de mecanizado de acuerdo al diseño original creado en el sistema CAD/CAM. Los objetivos secundarios están orientados a la seguridad del sistema y del operador.

Los componentes principales del sistema electrónico son:

- Controladora CNC.
- Etapa de potencia conformada por los drivers.
- Elementos finales de control (motores paso a paso para cada eje más el spindle).
- Sensores finales de carrera o LimitSw que detectaran la posición máxima y mínima de cada eje.
- Protecciones eléctricas.
- Fuente de alimentación AC/DC.

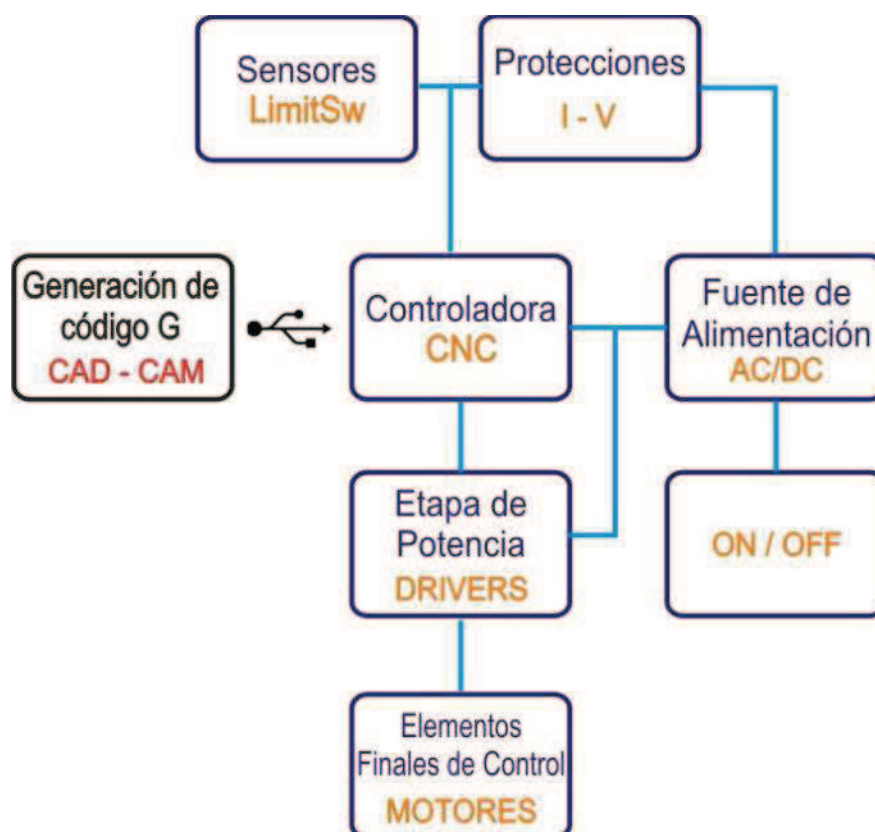


Figura 3.2 Etapas del Sistema electrónico.



## **3.2 DISEÑO Y SELECCIÓN DE MOTORES PARA LOS EJES X, Y, Z**

En la sección 1.6 del capítulo 1, se determinaron los requerimientos de torque y potencia necesarios para accionar el sistema de transmisión de movimiento mecánico. Para cumplir con este objetivo se tienen dos actuadores que cumplen con los requisitos, los cuales son:

- Servo motores.
- Motores paso a paso o PAP.

Para la selección del tipo de motor más apropiado se adoptan los siguientes criterios.

- Posibilidad y configuración de la resolución de giro.
- Relación costo-beneficio, el sistema debe ser robusto y confiable a un costo razonable.
- Costo y periodos de mantenimiento bajos.
- Tipo, complejidad y costo del sistema de control.
- Stock de repuestos y disponibilidad en caso de reposición.

De acuerdo a estas características se elige usar motores paso a paso con un control por micro pasos, los cuales son libres de mantenimiento y se puede ejercer control en lazo abierto.

Para poder determinar la clase de motor paso a paso, la configuración y el tipo de control, se hace una comparación entre los existentes en el mercado a fin de cumplir de mejor manera los requerimientos de diseño.

### **3.2.1 SELECCIÓN DE MOTORES PASO A PASO (PAP)**

Los motores de paso a paso o PAP son máquinas electromecánicas que convierten pulsos eléctricos en desplazamientos angulares, es decir su eje se mueve un cierto número de grados o pasos, dependiendo de sus entradas de control.

#### **3.2.1.1 Ventajas de los motores PAP**

- Los grados de rotación son proporcionales a los pulsos de entrada.

- El torque máximo se obtiene cuando está enclavado, es decir las bobinas energizadas.
- Los motores PAP tienen un error máximo del 3% al 5% de la unidad de rotación, el cual no es acumulativo de un paso a otro
- Control en el arranque, paro e inversión de movimiento.
- El motor es controlado mediante pulsos digitales, el riesgo de pérdida de datos es mínimo, lo que permite un control de lazo abierto.
- Se ejerce control de forma eficiente en bajas velocidades, además se tiene amplio rango de velocidades de rotación, dado que la misma es proporcional a la frecuencia de los pulsos de entrada.

### **3.2.1.2 Desventajas de los motores PAP**

- Cuando el sistema de control no es adecuado aparece el fenómeno de resonancia.
- Se requiere un sistema de control robusto cuando se trabaja a altas velocidades y cargas que exigen operación al 100%.
- Cuando el sistema mecánico no es estable puede existir pérdida de posición del sistema.
- Alta temperatura de operación en trabajo continuo.

### **3.2.1.3 Clases de motores PAP**

Existen tres clases de motores PAP:

- PAP de imán permanente.
- PAP de reluctancia variable.
- PAP híbridos.

Los PAP con imán permanente tienen magnetizado el rotor, y los de reluctancia variable tienen rotores dentados de hierro dulce mientras que los híbridos son una combinación de las dos tecnologías. A continuación se describe los motores PAP híbridos por ser utilizados en el presente proyecto de titulación.

#### *3.2.1.3.1 PAP Híbridos*

Los PAP híbridos paso a paso son una combinación de los principios de funcionamiento de los motores PAP de imán permanente y de reluctancia

variable, extrayendo de cada uno sus mejores características, es así que se tiene ángulos de paso pequeños y alto torque.

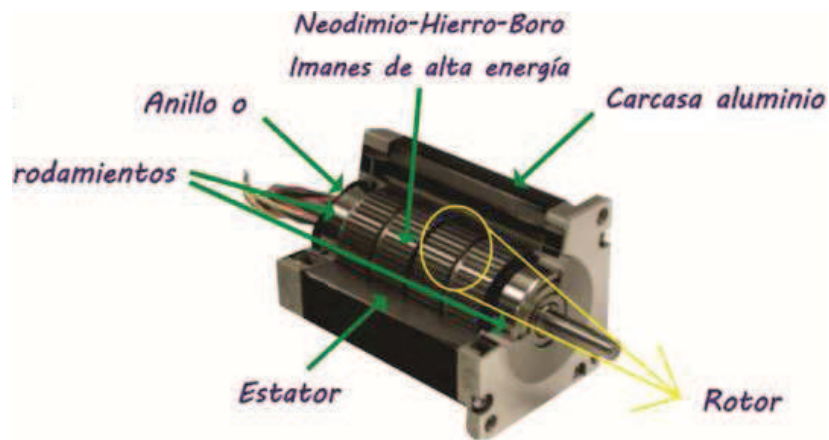


Figura 3.3 PAP híbrido.

El estator es prácticamente igual a los PAP de imán permanente y reluctancia variable. Las diferencias radican en la estructura del rotor, formado por un disco cilíndrico imantado en posición longitudinal al eje.

En la Figura. 3.4 (a). Las líneas magnéticas generadas por el imán son guiadas por dos cilindros acoplados a los extremos de cada uno de sus polos (norte y sur), estos están formados por láminas de material ferro magnético y dentado, constituyendo los polos del rotor. El flujo magnético generado por las bobinas del estator fluye según muestra la Figura. 3.4 (b).

El motor híbrido tiene un torque igual al de reluctancia variable. La diferencia radica en tipo de excitación utilizada. En el motor híbrido la excitación es conjunta entre el bobinado y el imán.

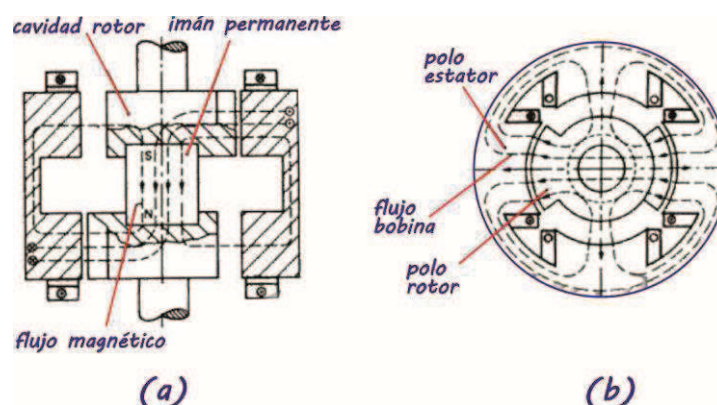


Figura 3.4 PAP híbrido y el flujo magnético, ángulo de paso de 90°.

Para obtener ángulos de paso más pequeños, basta con incrementar el número de polos del rotor y del estator lo cual está limitado por el número de polos que puede contener el estator y la cantidad de dientes.

### 3.2.1.3.2 PAP Híbridos de dos fases

Los PAP híbridos de dos fases son muy utilizados debido a sus características, al control relativamente simple con respecto a otros modelos con más fases. El modelo básico está conformado por cuatro polos en el estator, la fase A esta formada por el bobinado del polo 1 en serie con el bobinado del polo 3. Los bobinados en serie de los polos 2 y 4 forman la fase B.

Cuando el rotor se encuentra en posición de equilibrio con una fase excitada, los dientes de un polo de la fase del estator coinciden con los dientes del polo norte del imán permanente, y los del otro polo con el polo sur.

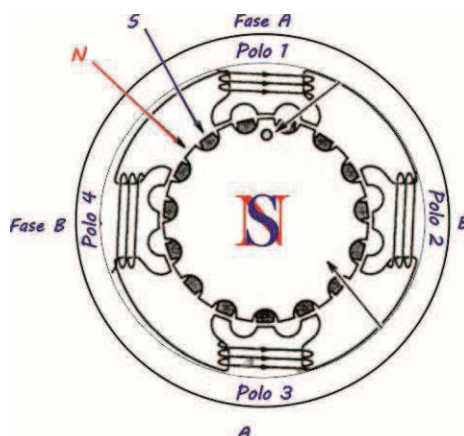


Figura 3.5 PAP híbrido de dos fases.

El funcionamiento se lo ilustra en la Figura. 3.5, al excitar las bobinas del estator se alinean los dientes del estator con los del rotor de la carga apropiada.

En el paso 1 se excitan las bobinas impares, polo norte (N) en las bobinas 1 y 5, y polo sur (S) en las bobinas 3 y 7; y el rotor se alinea con el campo.

En el paso 2 se excitan las bobinas pares, polos N las 2 y 6, y polo S las 4 y 8; entonces el rotor buscando alinear los dientes más próximos a los del estator se desplaza un ángulo que se corresponde a un cuarto del paso de los dientes.

En el paso tres se alimentan nuevamente las bobinas impares, polo N en las bobinas 3 y 7, y polo S en las bobinas 1 y 5, el rotor se gira otro cuarto de paso. Entonces se ve que cuando se realicen 5 pasos se repiten los estados de

excitación del estator consiguiendo una rotación del rotor correspondiente al paso de un diente. La Figura 3.6 resume el funcionamiento.

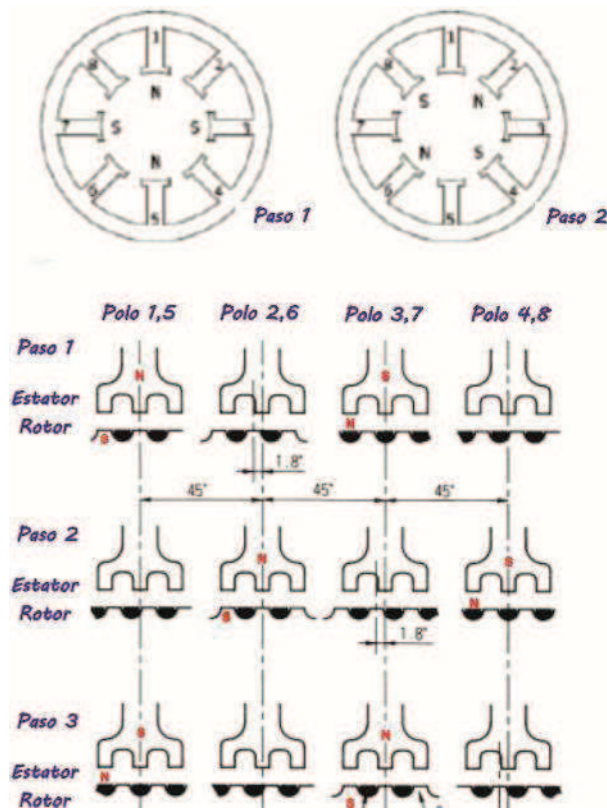


Figura 3.6 Principio de funcionamiento PAP híbrido.

### 3.2.1.3.3 Características de operación de un motor PAP híbrido

Los PAP híbridos son motores que tienen dos arrollamientos (dos fases) que son energizados con corriente continua. Cuando la corriente en una bobina se invierte el eje del motor se mueve un paso. Al invertir la corriente en cada bobinado la posición y la velocidad del motor es controlada fácilmente y con precisión, por lo que estos motores son de gran utilidad en aplicaciones industriales.

Se obtiene una mayor resolución y un funcionamiento más suave cuando se utiliza el micro-escalonamiento de unidades es decir se divide a cada paso en micro pasos controlando la magnitud de la corriente en cada bobinado.

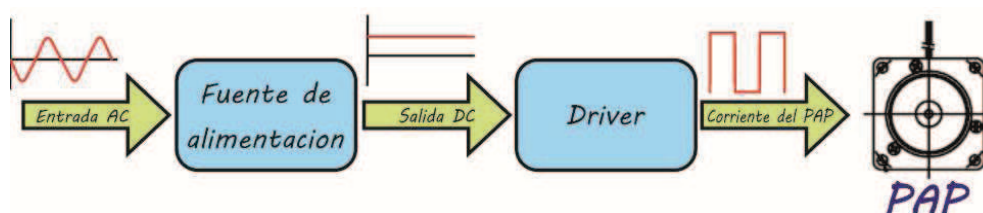


Figura 3.7 Sistema de control de un PAP.

### **3.2.2 FACTORES DE SELECCIÓN DE UN PAP**

Los criterios por el cual se seleccionó el tipo de motor híbrido son: requerimientos de torque del sistema, la potencia, el tipo de control a implementar, resolución y las características físicas.

#### **3.2.2.1 PAP híbrido vs reluctancia variable vs imán permanente**

En todos los motores PAP el torque decrece con la velocidad por lo que los de imán permanente y los híbridos están diseñados para trabajar con un máximo de 5000 pasos por segundo, mientras que los de reluctancia variable pueden funcionar hasta los 10000 pasos por segundo.

Los de reluctancia variable son más ruidosos que los de imán permanente o híbridos.

Los híbridos y de imán permanente pueden ser controlados por microstepping, permitiendo el posicionado en fracciones de pasos.

#### **3.2.2.2 Híbridos vs. Imán Permanente**

Un PAP imán permanente son más baratos, fáciles de conseguir, son fabricados con pasos de 30 a 3.6 grados, mientras que los híbridos tienen un mayor costo, son más escasos, su ventaja es el tamaño de paso que va desde 3.6 a 0.9 grados, es decir de 100 a 400 pasos por vuelta.

#### **3.2.2.3 Unipolares vs. Bipolares**

Los PAP de imán permanente e híbridos pueden ser unipolares, bipolares o bifilares. La diferencia radica en potencia, tipo de control, volumen y peso

Un PAP bipolares tiene aproximadamente 30% más de torque que su equivalente unipolar debido a que únicamente la mitad de un bobinado está energizado en un tiempo, en los motores bipolares todo el bobinado es energizado, sin embargo el sistema de control que se requiere es más complejo.

### **3.2.3 SELECCIÓN LOS MOTORES PASO A PASO DEL SISTEMA CNC**

De las características antes expuestas se selecciona motores a pasos híbridos con una resolución de 1.8 grados los cuales van a ser manejados por micro pasos

obteniendo de esta manera un torque alto y buena resolución a la velocidad de operación requerida.

En la sección 1.6 del capítulo 1, se calculó las características de torque y potencia para cada eje los cuales se resumen en la Tabla 3.1.

EJE	Torque [Nm]	Potencia [W]
X	3.4	228.07
Y	1.74	116.6
Z	1.05	70.75

Tabla 3.1 Requerimientos de torque y potencia del sistema.

Las características adicionales requeridas para seleccionar PAP híbrido son:

- **Torque dinámico o de trabajo (Working Torque “Tw”)**

Es el torque máximo que el PAP puede desarrollar sin perder pasos, es decir, sin dejar de responder a impulsos de excitación. Generalmente el fabricante proporciona las curvas de arranque sin error (pull-in) y la de relación entre torque y los pulsos por segundo.

- **Torque de mantenimiento (Holding Torque “Tm”)**

Es el torque requerido para mover un paso el rotor cuando la posición anterior es estable; es mayor que el par dinámico y actúa como freno para mantener el rotor en una posición estable dada.

- **Torque de detención (Detent Torque)**

Es un torque de frenado debido a la acción del rotor cuando los devanados estáticos están desactivados.

- **Angulo de paso (Step angle)**

Avance angular, indica los grados que gira cuando recibe un impulso de excitación.

- **Número de pasos por vuelta**

Cantidad de pasos necesarios para dar una revolución completa.



- **Error de paso**

Es el error total introducido por el motor en el movimiento de un paso simple. Se expresa en porcentaje y siempre es menor al 5% de la unidad de movimiento.

- **Tiempo de vida útil**

Los PAP son muy robustos, no tienen escobillas por lo general los componentes del sistema se desgastan antes de que el motor lo haga, pero si el PAP no cuenta con las debidas protecciones la vida útil se reducirá drásticamente. Los aspectos que influyen en la vida útil son:

- Se debe elegir para trabajar del 40 al 60 % del torque máximo.
- Los PAP trabajan a altas temperaturas por lo que se debe contar con la ventilación adecuada y de ser el caso se debe colocar disipadores de calor [26].

En base los requerimientos se seleccionan motores PAP híbridos NEMA34, cuyas características se resumen en las tablas 3.2 y 3.3.

Característica	Especificaciones
Angulo por paso	1.8°
Paso Precisión Angular	±5% (full step, sin carga)
Aumento de la temperatura	80°C Max.
Temperatura ambiente	-20°C~+50°C
Resistencia de aislamiento	100M Ω Min. ,500VDC
Rigidez dieléctrica	500VAC por un minuto
Max. fuerza radial	200 N ( 20mm de la brida )
Max. fuerza axial	60N

Tabla 3.2 Características motores PAP híbridos NEMA 34, tomado de [27].



Modelo No.		Corriente /Fase	Resistencia /Fase	Inductancia /Fase	Torque de mantenimiento	Inercia rotor	Torque Detent	Length
EJE	Unidades	A	$\Omega$	mH	Nm	g-cm <sup>2</sup>	kg-cm	mm
Z	SY85STH80-5504B	5.5	0.46	4	4.6	1400	1.2	80
Y	SY85STH118-6004B	6	0.6	6.5	8.7	2700	2.4	118
X	SY85STH156-6204B	6.2	0.75	9	12.2	4000	0.36	156

Tabla 3.3 Características de los motores PAP híbridos NEMA 34 seleccionados tomado de [27]..



Figura 3.8 Motores PAP híbridos seleccionados NEMA 34.

La distribución de bobinados, curvas de trabajo y especificaciones adicionales se encuentran en el anexo B, al final del presente trabajo.

Una vez definido el tipo de motor PAP a utilizarse según los requerimientos del sistema mecánico, se debe definir el sistema de control que se ejercerá, en la siguiente sección se detalla la técnica a usarse.

### 3.3 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE LOS MOTORES PAP HÍBRIDOS

El control del centro de mecanizado a implementarse requiere tener características de velocidad, torque, precisión y resolución altas por lo que la mejor técnica implementarse es la de micropasos (microstepping), la descripción de este método y sustentación de elección se presentan a continuación.

### 3.3.1 CONTROL POR MICROPASOS (MICROSTEPPING) [28]

#### 3.3.1.1 Principios de funcionamiento del control por micropasos

Controlar un PAP mediante micropasos consiste en dividir la longitud de un paso en pequeños incrementos de la posición del rotor, realizando un control especial sobre la excitación de los bobinados de las fases.

El torque estático producido es proporcional a la corriente de las fases, la curva característica del torque varía de forma senoidal, con la posición del rotor el torque obtenido es:

$$T_A = -K_p * i_A * \text{Sen}(d\theta) \quad [N.m] \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$T_B = -K_p * i_B * \text{Sen} \left[ d \left( \theta - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad [N.m] \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde  $K_p$  es la constante de proporcionalidad entre el torque obtenido y la intensidad por la fase  $i_A$  e  $i_B$ ,  $T_a$  y  $T_b$  son ondas sinusoidales en cuadratura (90 grados desfasadas).

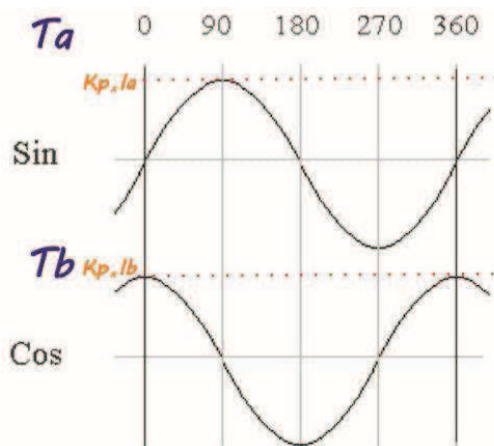


Figura 3.9 Torque y corriente en micropasos.

La forma senoidal y cosenoidal de la corriente permite la transición continua de un polo (posición de paso completo) a la siguiente. Cuando una bobina incrementa su torque la otra disminuye en la misma proporción lo que permite tener un torque constante, permitiendo el avance del rotor sin problemas.

El torque es el mismo para todos los ángulos, porque la corriente es siempre proporcional entre las dos bobinas.

La energía se calcula como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de corriente en cada bobina, por lo que se tiene:

$$K\text{Sen}(\alpha)^2 + K\text{Cos}(\alpha)^2 = K \quad \text{Ec. 3.3}$$

De modo que la suma de los cuadrados es constante. Por lo que el motor tiene un torque constante durante todo el ciclo.

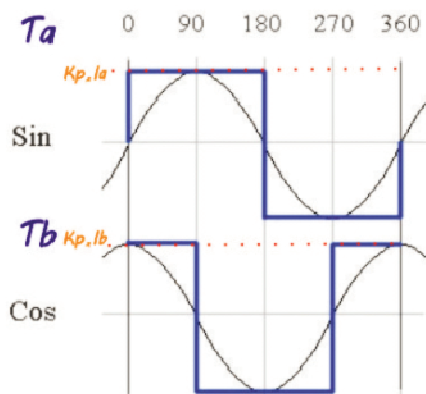


Figura 3.10 Formas de onda de corriente driver bipolar PAP.

La corriente en un driver bipolar no es sinusoidal, como se observa en la Figura 3.10, no hay transiciones suaves, sin embargo estas características son recomendadas en aplicaciones donde sólo es necesario manejar el PAP en pasos completos, donde se pueda mantener la posición sin corriente aplicada, por medio del torque magnético de retención.

Para la mayoría de aplicaciones se tiene que el driver bipolar con una onda cuadrada tiene serios problemas con el consumo de corriente y ruido provocado especialmente por las frecuencias de resonancia del motor PAP y la del sistema mecánico.

Los efectos de la resonancia en el PAP se solucionan aplicando un control por micropasos. Para implementar un driver de micropasos se debe añadir un conversor digital a analógico (DAC) al circuito de control de corriente chopper, de esta manera el driver se puede ajustar digitalmente la tensión de referencia y por tanto, regular la corriente a través de la bobina, en pasos discretos. (La corriente en la bobina se desarrolla como un voltaje a través del resistor de detección.) Cuando la frecuencia de muestreo es lo suficientemente grande se tiene como resultado una salida discreta semejante a la onda senoidal.

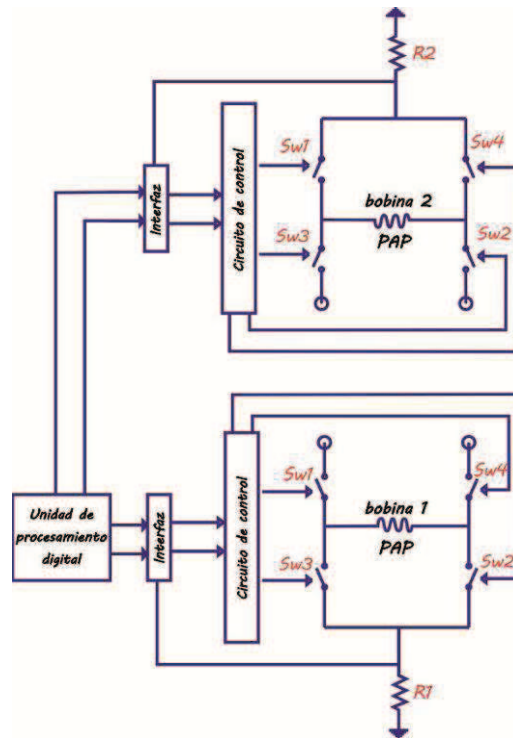


Figura 3.11 Esquema driver micro pasos PAP.

Un driver de micropasos, puede subdividir el ángulo de paso de los motores en varias partes, en la Figura 3.11, se muestra una representación del driver de micropasos, que es básicamente dos puentes en H con control de corriente digital. Este circuito controla las dos bobinas del motor paso a paso. Se debe tener en cuenta que la dirección y los niveles de corriente deben estar sincronizados para crear el desfase de 90 grados, es decir tener las funciones seno y coseno.

La forma de onda de voltaje en R1 y R2 son ondas sinusoidales rectificadas en cuadratura en valor absoluto, ya que nunca se hace negativo en la resistencia de detección debido a que invierte la dirección de la corriente en la bobina.

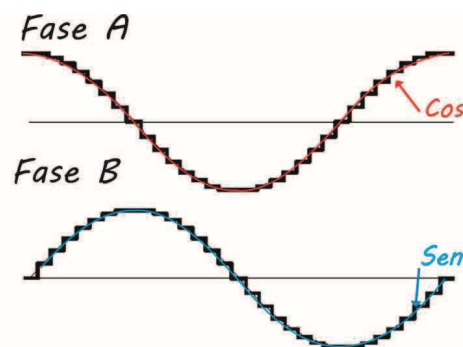


Figura 3.12 Corriente en las fases, control por micropasos.

### 3.3.2 DIAGRAMAS FASORIALES EN LOS MOTORES PAP CONTROLADOS POR MICROPASOS

Los diagramas fasoriales son útiles para representar los grados que gira un PAP al suministrarle una corriente dada.

Se tienen dos ejes, el X e Y en cuadratura formando un sistema cartesiano, los cuales indican el nivel de corriente en las dos bobinas (eje X corriente en A y eje Y corriente en B). Se trazan vectores desde el punto (0,0) para determinar el torque que existirá en un micropaso en particular. De la sección 3.2, Tabla 3.3 se tiene que los PAP híbridos seleccionados son de 200 pasos por revolución, es decir 1.8 grados. Por lo que se va a realizar el diagrama fasorial para este tipo de motor a continuación.

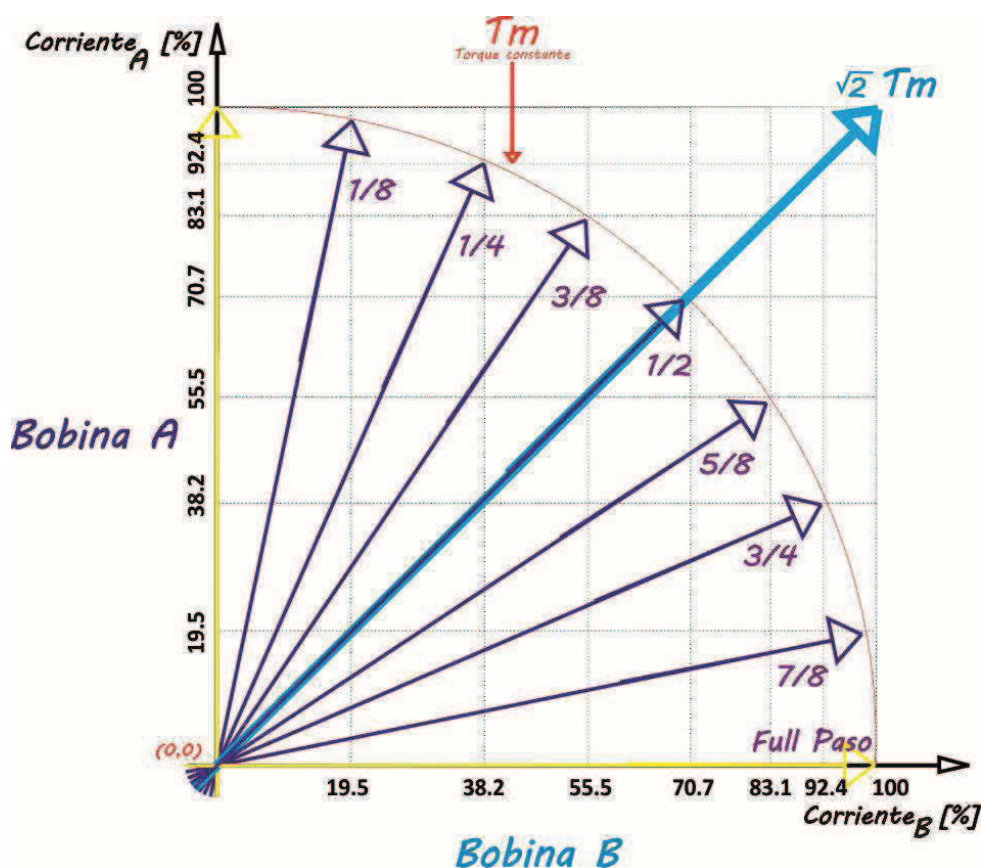


Figura 3.13 Diagrama fasorial.

Los vectores de color **amarillo** corresponden a la corriente al 100% en la bobina A y al 100% en la bobina B.

En el micropaso 1/2 existen dos vectores el celeste representa el torque generado cuando se controla en medios pasos (Half Step), en las dos bobinas se tiene el 100% de la corriente, la magnitud del torque es mayor en 1,41 veces al torque que se obtiene en el control con micropasos ( $T_m$ ), trigonométricamente es la hipotenusa, que tiene por catetos a  $T_m$ , por lo que el torque no es constante, en consecuencia la técnica de Half Step no es recomendable para la aplicación a implementarse.

Al considerar el vector azul del micropaso 1/2 corresponde al torque ( $T_m$ ) que es el mismo que el de los extremos, lo cual es posible por la reducción de la corriente a 0,707 la corriente en cada bobina.

Todos los vectores en azul tienen un torque constante, esto se debe a la reducción de corriente en una bobina mientras aumenta en la misma proporción en la otra bobina.

Del diagrama fasorial se deduce la función realizada por un driver de micropasos el cual utiliza los niveles actuales en cada una de las dos bobinas para lograr el sub-ángulo deseado. La división de un paso en micropasos está limitada por la precisión del motor y del driver Microstepping. En la práctica se recomienda dividir a un paso de 8 a 16 micropasos como máximo, valores más altos causaran inestabilidad en el sistema.

Secuencia	Corriente fase A [%]	Corriente fase B [%]	Posición	Torque
0	100	0	Full step	$T_m$
1	98.1	19.5	1/8	$T_m$
2	92.1	38.2	1/4	$T_m$
3	83.1	55.5	3/8	$T_m$
4	70.7	70.7	1/2	$T_m$
5	55.5	83.1	5/8	$T_m$
6	38.2	92.1	3/4	$T_m$
7	19.5	98.1	7/8	$T_m$
8	0	100	Full step	$T_m$
4	100	100	1/2 step	$\sqrt{2}T_m$

Tabla 3.4 Corriente en las bobinas A y B controlados por micropasos.

Como se aprecia en la Tabla 3.4 los valores que deben tomar las corrientes de las bobinas deben ser muy precisos, ya que cualquier diferencia afectará el torque del motor. Es por este motivo que se requiere de un bloque digital – análogo que sense la corriente en forma permanente, conocido como DAC, como lo muestra la Figura 3.7.

### 3.3.3 DRIVERS MICROSTEPPING SELECCIONADOS

En base a las características antes descritas se selecciona los siguientes drivers para manejar a los motores paso a paso híbridos.

#### 3.3.3.1 Selección de drivers para el eje Z y eje Y

Por sus características el driver 2M880N es adecuado para el control de motores paso a paso de las serie **SY85STH**, con un alto rendimiento en micro pasos.

Incorporan un control por micro controlador con DSP lo que le permite implementar un algoritmo de control avanzado de corriente manejando al motor PAP híbrido de 2 fases. Por lo que reduce el ruido y la vibración, eliminando el problema de la resonancia resultado de lo cual se tiene un sistema robusto que puede trabajar en lazo abierto, sin pérdida de información (“perdida de posición en los motores PAP”).

A continuación se describen sus características principales, la información detallada se encuentra mediante el anexo B.

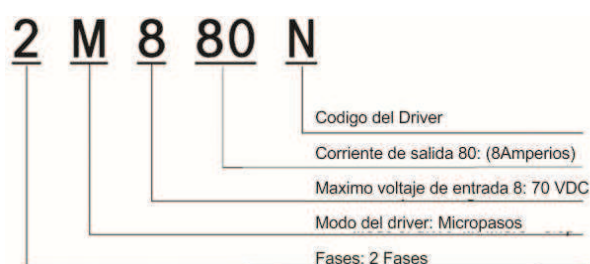


Figura 3.14 Características driver 2M880N, tomado de [29].

- Regulación automática de parámetros ajustables.
- Auto test de corriente.
- Auto reconocimiento de los parámetros de R y L.
- Entradas de señales de control: PLS + DIR y CW / CCW.
- Salida aislada opto acoplada, ERR para proteger al driver.

- Se puede trabajar con la corriente completa o al 50%.
- Señales de entrada opto aisladas, con una respuesta de frecuencia de pulso de hasta 400 kHz, la máxima es de 256 micropasos.
- Protección de sobre-voltaje, bajo voltaje, sobre corriente, sobrecalentamiento.



Figura 3.15 Driver Kinco 2M880N.

Parámetros	Descripción
Voltaje de entrada [Vdc]	24 a 70
Corriente de salida [A]	2.4 a 8 (corriente pico)
Micropasos	2 a 256
Señales de entrada	PLS, DIR, FREE una I de 6 a 16mA
Modo de control	PLS+DIR; CW/CCW
Señales de salida	ERR salida de colector abierto max.20Ma
Protecciones	Sobre voltaje, bajo voltaje, sobre corriente, sobre calentamiento.

Tabla 3.5 Características eléctricas 2M880N, tomado de [29].



Método de ventilación		Circulación natural de aire
Ambiente	Operación	Evite ambientes corrosivos, húmedos
	Humedad	85% RH
	Temperatura	0 a 40 grados
	Temperatura de almacenamiento	20 a 70 grados
Protección		IP 20

Tabla 3.6 Ambiente de operación 2M880N, tomado de [29].

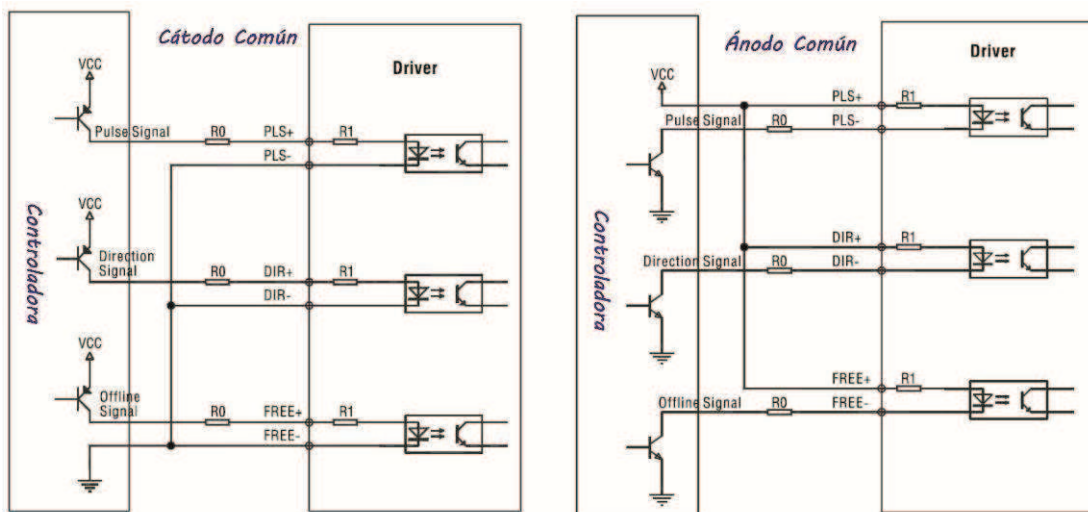


Figura 3.16 Conexiones típicas driver Kinco 2M880N, tomado de [29].

La Figura 3.16 muestra las dos conexiones típicas de driver la cuales dependen del tipo de alimentación de las señales de control.

Si la señal de control va de 0 a 12 Vcc, R1 debe ser de 1K $\Omega$ , La corriente en el puerto de entrada debe ser de 6 a 16 mA como máximo.

La señal de ERR es de colector abierto y requiere una fuente de alimentación externa no mayor a 30V.

Los circuitos de entrada de todas las señales de control del driver están opto acopladas minimizando la interferencia de ruidos externos eléctricos.

R0 es una resistencia externa de límite de corriente usada para limitar la señal de entrada de corriente al driver. Es usada cuando Vcc = 24Vdc, (R0= 2K $\Omega$ ).

### 3.3.3.2 Selección driver eje X

Por sus características se selecciona el driver digital Leadshine AM882 con detector de bloqueo “DSP”, aporta un nivel de control total al sistema, proporcionando corriente óptima, tiene una función de auto-test de parámetros del motor permitiéndole funcionar con menor ruido, menor calentamiento, un movimiento más suave.

El AM882 tiene una función adicional que es el de detección de bloqueo por lo que puede trabajar de manera confiable sin realimentación, es decir en lazo abierto.

A continuación se describen sus características principales, sus demás características se encuentran en el anexo B.

- Se puede trabajar en lazo abierto, gracias al detector de bloqueo incorporado y detector de inactividad.
- Sistema anti-resonancia proporcionando un torque motor óptimo.
- Auto-identificación de los parámetros de motor por lo que el control se lo realiza de una mejor manera para cada tipo de PAP.
- Multi-Stepping permite una entrada escalón de baja resolución para producir una salida microstep superior para un rendimiento suave.
- Voltaje de alimentación a +80 VCC Corriente de salida programable, desde 0.1A a 8.2A.
- Entradas opto-aisladas, compatibles con TTL (PUL, DIR, CW / CCW), pulso de frecuencia de entrada de hasta 200 Khz.
- Protección de sobre voltajes, bajos voltajes, sobre corrientes y sobre calentamiento.



Figura 3.17 Driver Leadshine AM882, tomado de [30].

Parámetros	Min.	Típico	Max.	Unidades
Corriente de salida	0.1	-	8.2 (5.86 RMS)	A
Voltaje de alimentación	+20	+68	+80	mA
Señal lógica de corriente	7	10	16	Khz
Frecuencia de pulsos	0	-	200	MΩ
Resistencia de aislamiento	500	-	-	Ω

Tabla 3.7 Características eléctricas AM882, tomado de [30].

Ventilación	Circulación natural de aire	
Ambiente de operación	Ambiente	Evitar corrosivos y húmedos
	Temperatura ambiente	0 a 50 grados
	Humedad	40% a 90% HR
	Temperatura de trabajo	70 grados
	Vibración	5.9 $m/s^2$
Temperatura de almacenamiento	De 20 a 65 grados	
Peso	570 gramos	

Tabla 3.8 Ambiente de operación AM882, tomado de [30].

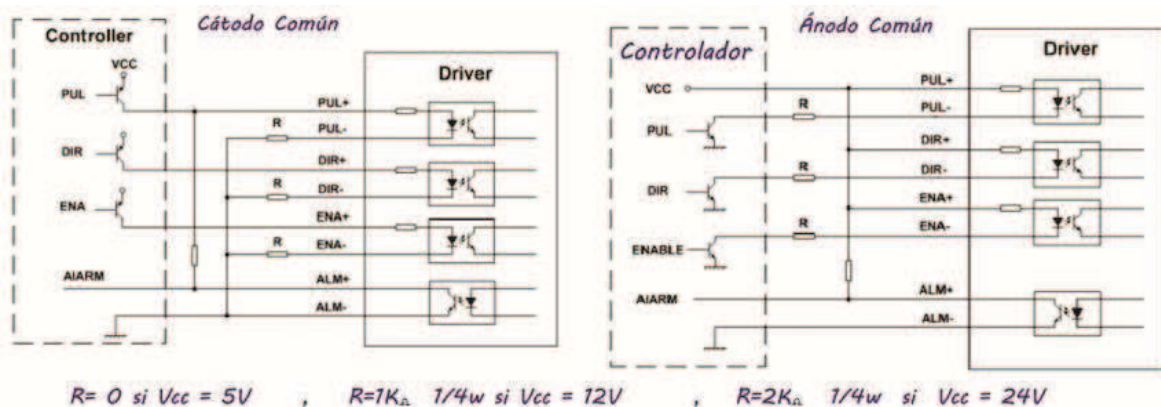


Figura 3.18 Conexiones driver Leadshine AM882, tomado de [30].

### 3.4 FUENTE DE ALIMENTACIÓN AC/DC

En la presente sección se estudia los tipos de fuentes de alimentación de uso industrial analizando sus ventajas y desventajas. Se describen las fuentes conmutadas por ser las usadas en el presente proyecto.

#### 3.4.1 TIPOS DE FUENTES DE ALIMENTACIÓN AC/DC

Desde una perspectiva simplificada del diseño eléctrico de las fuentes de alimentación, éstas pueden considerarse un dispositivo con una entrada AC y una salida DC la cuales están eléctricamente aisladas.

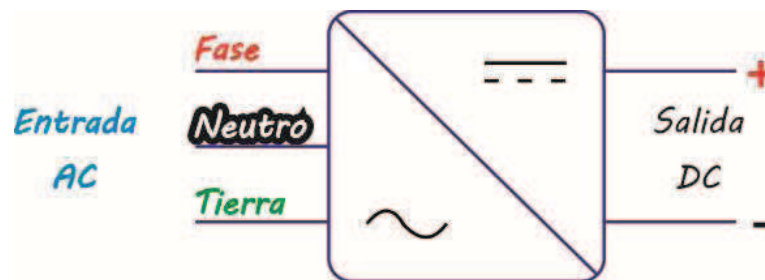


Figura 3.19 Esquema básico de una fuente de alimentación.

Las fuentes de alimentación se clasifican según la Figura 3.20:

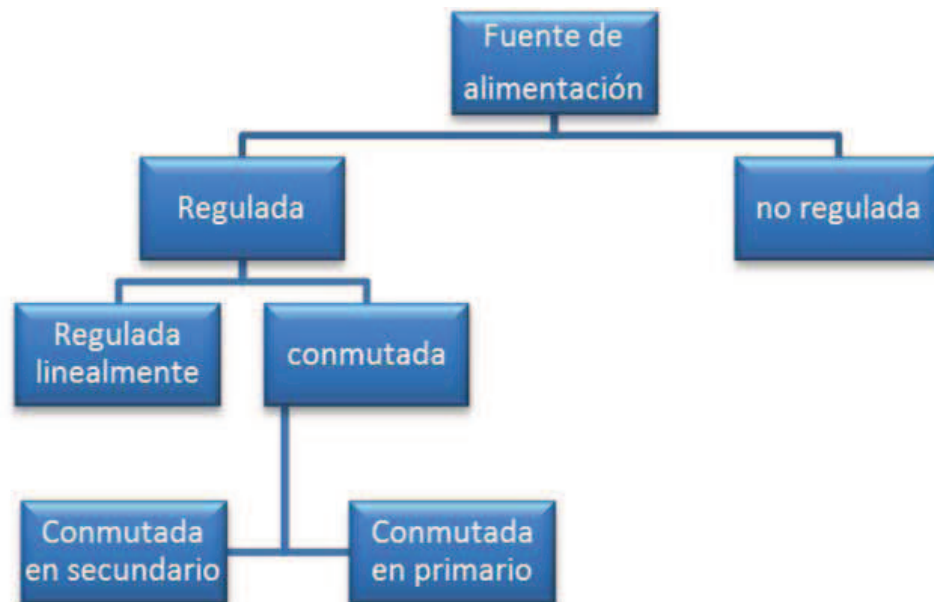


Figura 3.20 Clasificación de las fuentes de alimentación.

### 3.4.1.1 Fuentes de alimentación no reguladas [31]

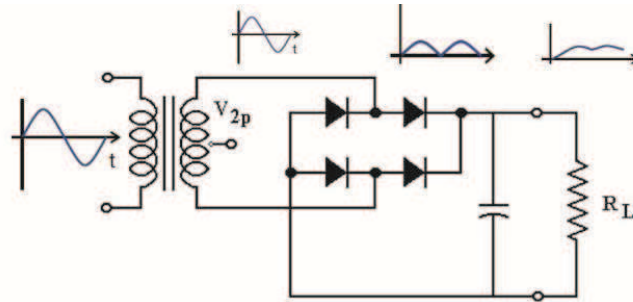


Figura 3.21 Esquema fuente no regulada.

Su funcionamiento radica en aplicar voltaje AC al primario del transformador en el secundario se obtiene voltaje generalmente de menor amplitud, luego entra a un bloque rectificador, obteniéndose voltaje DC pulsante. Para luego ser filtrado por un capacitor obteniendo DC casi puro, en la Figura 3.21 se muestra las formas de onda para cada etapa.

El voltaje DC de salida depende directamente del VAC de entrada, por lo que una variación en la entrada afecta a la salida.

Ventajas	Desventajas
Alto rendimiento	Gran tamaño
Durabilidad	Alto rizado residual
Rentabilidad	Ausencia de alimentación de CC

Tabla 3.9 Ventajas y desventajas fuente no regulada.

### 3.4.1.2 Fuentes de alimentación reguladas linealmente

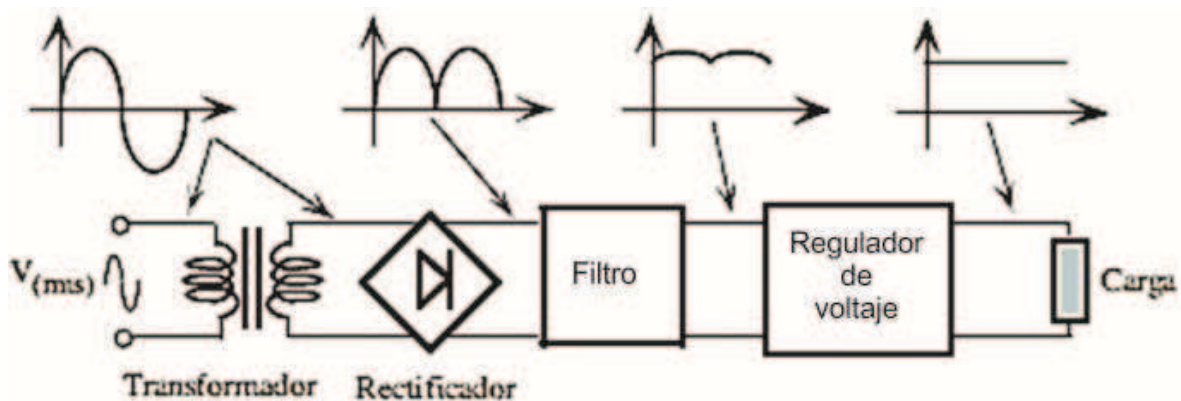


Figura 3.22 Fuente regulada linealmente.

El funcionamiento es igual a la fuente no regulada hasta la etapa de rectificado, a la salida del filtro se coloca un semiconductor de potencia (regulador de voltaje), más un circuito de accionamiento que mantiene el voltaje DC de salida constante.

Ventajas	Desventajas
Tiempos de regulación cortos	Bajo rendimiento $\approx 50\%$
Bajo rizado residual (mv)	Gran tamaño
Circuitos sencillos	Perdida de energía en forma de calor

Tabla 3.10 Ventajas y desventajas fuente regulada linealmente.

### 3.4.1.3 Fuentes de alimentación conmutadas [32]

En las fuentes de alimentación conmutadas conocidas también como fuentes switching, la transformación entre diferentes niveles de voltaje continuo se lleva a cabo a través de convertidores de CC – CC por medio de semiconductores configurados como interruptores on/off, es decir trabajando en su región no activa, por lo que disipan menos potencia.

La aplicación de fuentes conmutadas se ha extendido debido al desarrollo en los últimos años por los semiconductores de potencia, reduciendo los tiempos de encendido y apagado, aumentando la capacidad para manejar mayores voltajes y corrientes.

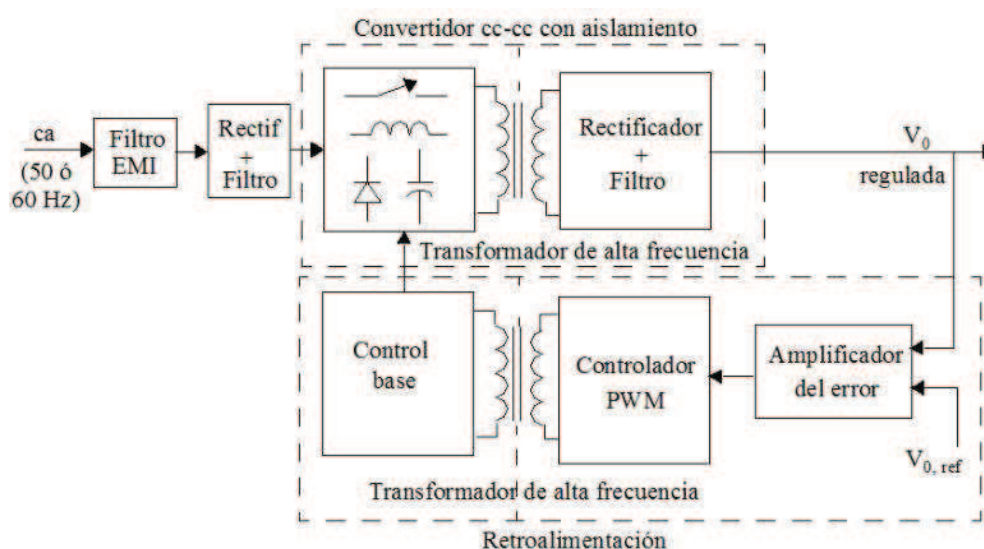


Figura 3.23 Esquema de una fuente regulada conmutada.

El funcionamiento de la fuente conmutada de la Figura 3.23 es el siguiente:

En la entrada de voltaje AC se tiene un filtro de EMI, el cual evita las interferencias electromagnéticas, luego se tiene una fuente no regulada, el voltaje de salida DC pasa a través de un convertidor CC - CC, esta etapa está formada por un transformador de alta frecuencia, consiguiendo un aislamiento galvánico entre la entrada y la salida. El voltaje en el secundario se rectifica y se filtra, obteniendo un voltaje DC. Para regular el voltaje de salida se realimenta y compara con el valor de referencia generándose una señal de error, la cual ingresa a un controlador de PWM el cual ejerce la acción de control sobre el convertidor CC-CC.

El aislamiento en este lazo de realimentación se lleva a cabo a través de un transformador.

Las ventajas principales de las fuentes de alimentación conmutadas son:

- El consumo de potencia es menor, debido a que los semiconductores no trabajan en su región activa, por lo que aumenta la eficiencia, entre el 70% y el 90%, frente 30% al 60% que tienen las fuentes lineales.
- Al conmutar a altas frecuencias el tamaño de los componentes son más reducidos que al operar a 60Hz

El aislamiento galvánico se lo realiza mediante un transformador que trabaja a la frecuencia de conmutación de los interruptores del convertidor.

<b>Ventajas</b>
Compactas de tamaño reducido
Livianas
Amplio rango de voltajes de entrada
Facilidad de regulación
Alto rendimiento (85% a 95%)
Compensación en caso de fallo red

Tabla 3.11 Ventajas de las fuentes conmutadas.



#### 3.4.1.3.1 Características de una fuente de alimentación conmutadas

Para que una fuente de alimentación sea confiable debe tener un circuito de control realimentado, protecciones contra las posibles fallas y cumplir con las normas establecidas, las características más importantes se describen a continuación:

- **Seguridad:**

Es el aspecto más importante, se debe precautelar siempre la seguridad de los equipos y de las personas que están en contacto, por lo que se debe contar con un sistema de aislamiento eléctrico.

- **Protección contra sólidos y líquidos**

La constitución y construcción física de la fuente debe prestar protección contra el ambiente al cual es expuesta, generalmente viene indicado por el grado de protección IP.

- **Funciones de protección eléctrica**

La fuente debe contar con protecciones adicionales que garantizaran la integridad del sistema en caso de falla. Entre las principales funciones se tiene:

- **Protección contra cortocircuitos y sobrecarga.** Desconecta la salida cuando la corriente supera el margen de seguridad generalmente entre el 1.2 a 1.5 veces la corriente nominal.
- **Protección térmica.** Desconecta la fuente cuando se sobre pasa la temperatura de funcionamiento.

- **Protección contra circuitos abiertos**

La protección contra circuito abierto garantiza que el voltaje en la salida de la fuente es constante incluso sin carga, lo que garantiza la disponibilidad inmediata de la fuente a cualquier instante

- **Resistencia a alimentación inversa**

Evita que exista recirculación de corriente, es decir que fluya corriente del sistema “carga” hacia la fuente.



- **Protección contra sobre voltajes en la salida**

En caso que la fuente tenga una falla interna, se tiene un sistema de protección que evitará que el voltaje de salida sea mayor que la deseada, esto se logra gracias al lazo de realimentación.

- **Protección contra fallos de alimentación**

Es la capacidad que tiene la fuente para trabajar ante una falla en la alimentación, se expresa en milisegundos.

- **Corrección de factor de potencia (CFP)**

Los de armónicos generados por el sistema son realimentados hacia red de entrada. Por lo general se tiene un CFP como parte del sistema, sin embargo en aplicaciones industriales debe tener un CFP para todo el sistema en general.

### **3.4.2 SELECCIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN**

Una vez analizada la fuente conmutada, la función que cumple y las características principales, se procede a seleccionar la fuente adecuada para el sistema. Para lo cual se define los parámetros del centro de mecanizado CNC a implementar en el presente trabajo.

#### **3.4.2.1 Voltaje de salida necesario**

- Drivers KINCO 2M880N requieren de 24 a 70 VDC.
- Driver LeadShine AM882 requiere de 20 a 80 VDC.

#### **3.4.2.2 Corriente requerida**

- Motor eje Z 5.5 A, a plena carga es decir a 4.6 Nm.
- Motor eje Y 6 A, a plena carga es decir a 8.7 Nm.
- Motor eje X 6.2 A, a plena carga es decir a 12.2 Nm.

En base a los criterios antes mencionados se opta por la fuente de poder SE-600 Mean Well, 12.5A, 48 V, 600W.



Figura 3.24 Fuente SE-600 Mean Well, tomado de [33].

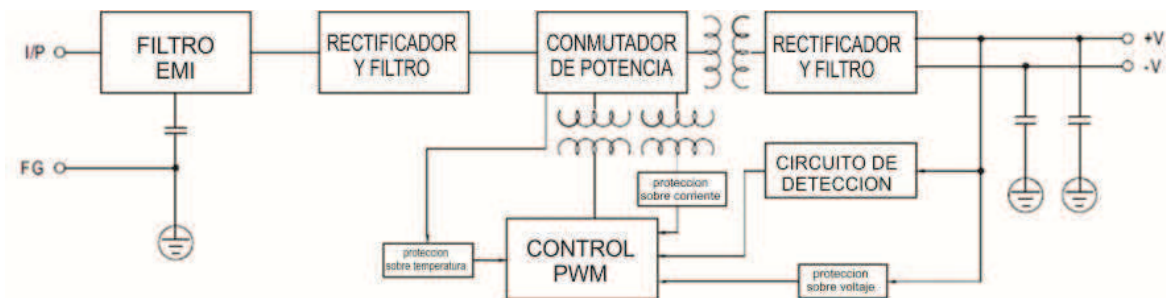


Figura 3.25 Diagrama a bloques fuente SE-600 Mean Well.

Fuente conmutada		Se-600-48
Salida	Voltaje DC	48 voltios (43 ~ 56 Vdc)
	Corriente máx.	12.5 amperios
	Potencia	600w
Entrada	Voltaje AC	100 ~ 220 Vac.
	Eficiencia	88% / 115vac
Protección	Sobre tensión, Sobre corriente, EMI, Corrientes armónicas, Sobre temperatura.	

Tabla 3.12 Principales características SE-600 Mean Well, tomado de [33].

### 3.5 CONTROLADORA CNC

La controladora CNC desde el punto de vista electrónico puede considerarse como el hardware de los sistemas CAD/CAM, está conformada por un conjunto de dispositivos electrónicos que reciben órdenes de movimiento de la PC siguiendo un protocolo de comunicación, para mediante los drivers accionar los motores

PAP. A más de la función principal maneja señales secundarias de información de finales de carrera, paros de emergencia, panel de mando manual, control de la herramienta de mecanizado o spindle y herramientas complementarias.

### 3.5.1 TIPOS DE CONTROLADORAS CNC

#### 3.5.1.1 Controladoras integradas

Una controladora CNC integrada, incorpora en un solo conjunto la interfaz de entradas/salidas con los drivers de los motores. Al estar todo en el mismo circuito pueden compartir recursos, ocupan menos espacio, son más económicas lo que representa una gran ventaja. Sin embargo son limitadas en cuanto a la potencia que pueden manejar, además al sufrir daño en una etapa, debe ser remplazada toda la controladora.

#### 3.5.1.2 Controladoras Modulares

Una controladora CNC modular separa la interfaz de entradas, salidas y la etapa de procesamiento de señal, lo que con lleva a mayor espacio y redundancia. La etapa de potencia no está considerada dentro de este conjunto, cuenta con salidas de control que permiten la conexión con drivers externos dándole mayor potencia. Su costo de implementación es mayor, el de mantenimiento es menor.

La Figura 3.26 ilustra los bloques de una controladora CNC.

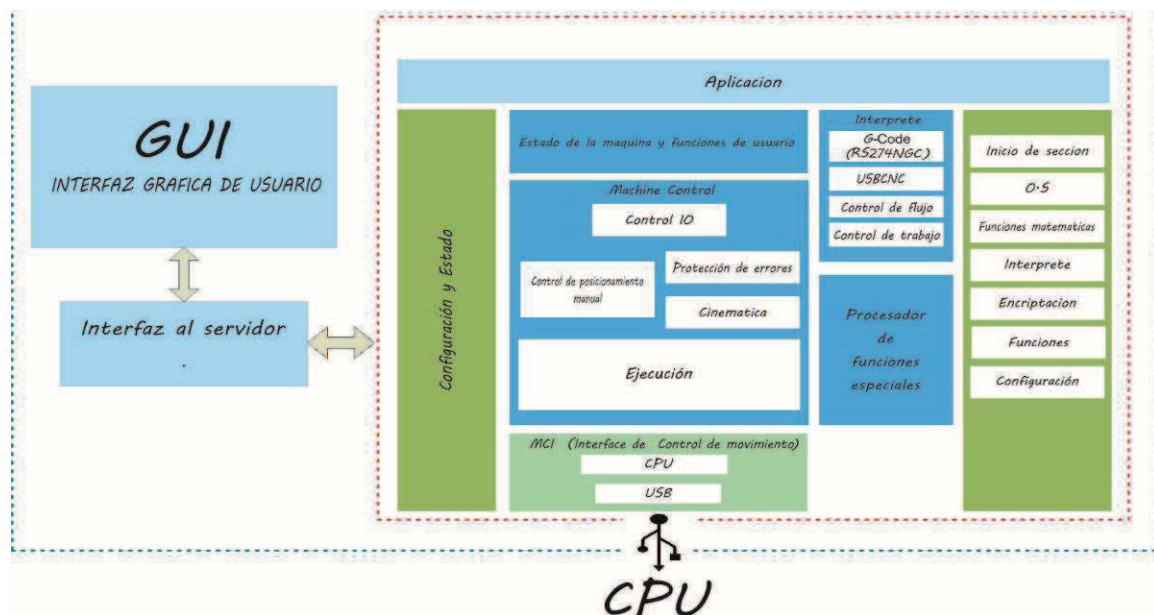


Figura 3.26 Diagrama de bloques de una controladora CNC.

### 3.5.2 SELECCIÓN DE LA TARJETA DE CONTROL CNC

De acuerdo a las características del centro de mecanizado, la tarjeta de control CNC debe tener los siguientes requisitos mínimos.

- Conexión USB con el computador, permitiéndole ser compatible con todas las computadoras de escritorio y personales, dándole una gran ventaja sobre sistemas tradicionales que ejercían el control por puerto paralelo (LPT) o puerto serial (COM), los cuales actualmente están descontinuados.
- Compatibilidad con programas de diseño gráfico, arquitectónico, y de mecanizado más populares, lo que le dará mayor aceptación por parte de los usuarios.
- Poder ser ejecutada sobre cualquier plataforma informática.
- Controlar tres ejes de movimiento, además se debe tener la posibilidad de ampliación de los ejes de control, dándole mayor versatilidad al sistema.

Una vez definidas las características de la controladora se selecciona la controladora Mk2 CNCUSB.

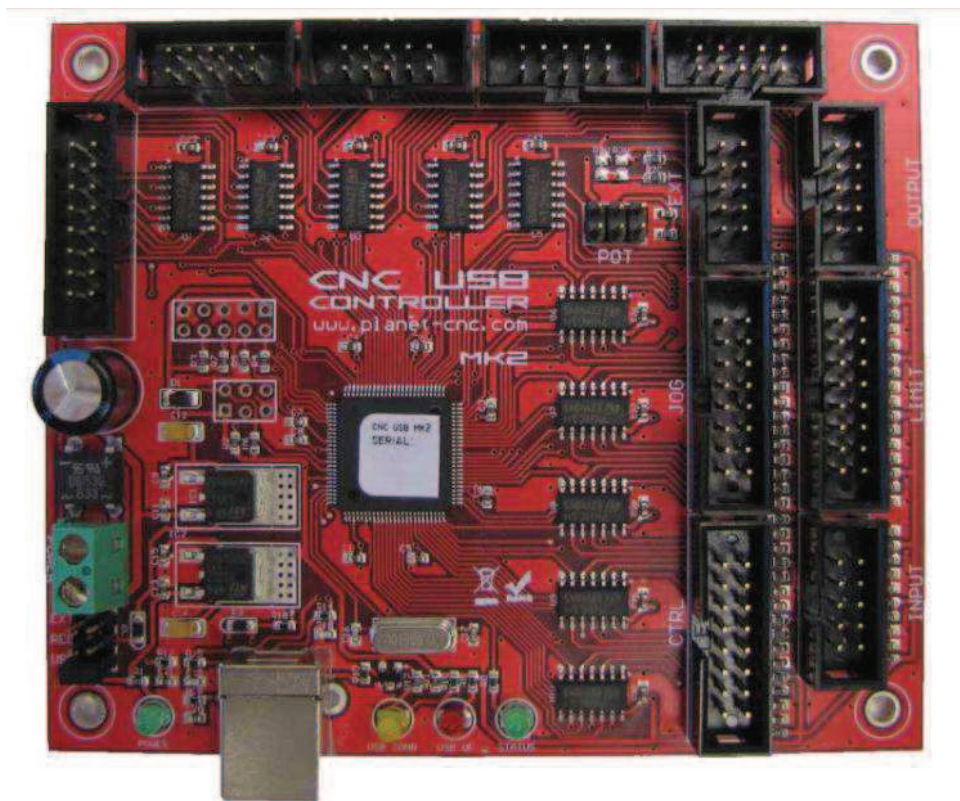


Figura 3.27 Controladora USB MK2.

### 3.5.3 CARACTERÍSTICAS DE LA CONTROLADORA CNC

Las características principales de la controladora usada en el presente proyecto son:

- 100 kHz de frecuencia máxima.
- 7 salidas digitales.
- 5 entradas generales.
- 8 entradas para el control.
- Soporte para tarjetas SD para ejecutar código G.
- Control de dispositivos externos con protocolo I2C.
- Conexión USB 2.0
- Compatible con la mayoría de drivers.
- Algoritmos de interpolación avanzados.
- Funciones de inicio, paro, pausa y reinicio del programa.
- Estándar de comunicación RS274/NGC G-code, Además es compatible con EMC2.
- Funciones G-códigos - G40, G41, G42, G43, G49.
- Funciones G-códigos - G54, G59.
- Compatible con todos los programas de CAM/CAD
- Importación de archivos DXF
- Importación archivos PLT / HPGL.
- Importación de archivos JPG.
- Importación de archivos NC
- Importación archivos Gerber (RS-274X)
- Interfaz que permite la simulación de las trayectorias a mecanizar.
- Exportación de trayectorias de herramientas para código G

### 3.6 INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE MOVIMIENTO Y CONTROL

En esta sección se describen los parámetros, condiciones, características y forma de conexiones al integrar todo el sistema electrónico, los diagramas y esquemas electrónicos se presentan en el anexo A.

#### 3.6.1 INTEGRACIÓN CONTROLADORA – DRIVERS

Se toman las siguientes salidas de la controladora y las entradas los drivers:

- **Paso (Pull)** Proporciona la señal de control para los motores paso a paso
- **Dirección (Dir)** Indica la dirección que gira el motor, esta es configurada de acuerdo a la posición en la que se realice el desplazamiento positivo dentro de la mesa de trabajo.
- **Habilitación (Enable/Free)** Proporciona una señal de habilitación para los drivers. Esta detiene los motores PAP en caso de un paro de emergencia, una condición no segura o pérdida de comunicación con la PC.

Se usan únicamente estas tres señales debido a que se elige la configuración de cátodo común, de esta forma no se alimenta al driver desde la controladora evitando así posibles daños debido al consumo de corriente.

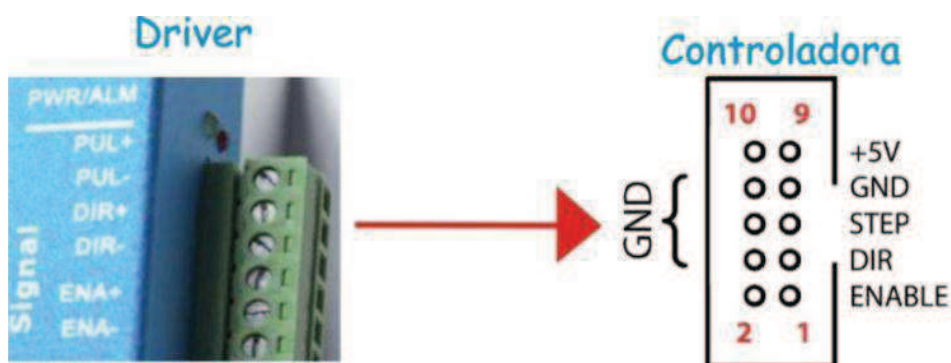


Figura 3.28 Puertos de conexión driver y controladora.

No se requiere de un circuito de acoplamiento adicional debido a que la controladora posee salidas con 74HC14, que es un Schmitt-trigger CMOS de alta velocidad asegurando de esta manera tener niveles definidos en las señales de control.



### 3.6.1.1 Configuración de parámetros driver – controladora eje X

Para el eje X se seleccionó el driver AM882, que cuenta con entradas opto aisladas por lo que no se requiere de un circuito de acoplamiento que proteja a la controladora. Para configurar el driver se procede de la siguiente manera:

Corriente del motor PAP eje X (SY85STH156-6204B) = 6.2 Amperios

La configuración más adecuada para el PAP de eje X es en serie ya que se obtiene un torque mayor a bajas velocidades. Se debe tener en cuenta que en este caso la corriente que maneja el driver es de un 70% de su corriente nominal para evitar el sobrecalentamiento en este tipo de configuración [30].

Por lo que la corriente para el motor X seria:

$$I_{\text{motorX}} = 6.2 \text{ A} * 0.7 = 4.34 \text{ A} \quad \text{Ec. 3.4}$$

La resolución del motor es de 1.8°, debido a que el control se realiza por micro pasos se tiene la siguiente expresión para calcular la resolución en grados:

$$\text{Número de pulsos por revolución} = \frac{\text{resolución en grados del motor}}{\text{numero de micropasos}} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Los pulsos por revolución se obtienen de la siguiente expresión:

$$\text{Número de pulsos por revolución} = \frac{1 \text{ revolución [grados]}}{\text{resolución del micropaso [grados]}} \quad \text{Ec. 3.6}$$

En el capítulo 1, sección 1.6, se seleccionó un tornillo de bolas re-circulantes con un paso de 5mm, por lo que la resolución en el avance está dada por:

$$\text{Resolución del avance} = \frac{\text{avance de 1 revolución [paso del ballscrew]}}{\text{pulsos por revolución}} \quad \text{Ec. 3.7}$$

El centro de mecanizado puede ser configurado para trabajar con milímetros o pulgadas como sistema de unidades, se elige como unidad a los milímetros por pertenecer al sistema internación de unidades que es el más usado en nuestro país.

Los pulsos que se requieren para que se avance una unidad [1mm] se los obtiene de la siguiente ecuación:

$$pulsos/unidad = \frac{pulsos/revolución}{avance}$$

Ec. 3.8

Aplicando las ecuaciones Ec. 3.5, Ec. 3.6, Ec. 3.7, Ec. 3.8 se tiene la siguiente tabla:

Resolución Grados	Micropasos	Resolución Grados implementando micropasos	Pulsos/revolución	Resolución en milímetros	Pulsos/ unidad
1,8	2	0,9	400	0,0125	80
1,8	4	0,45	800	0,00625	160
1,8	8	0,225	1600	0,003125	320
<b>1,8</b>	<b>16</b>	<b>0,1125</b>	<b>3200</b>	<b>0,0015625</b>	<b>640</b>
1,8	32	0,05625	6400	0,00078125	1280
1,8	64	0,028125	12800	0,00039063	2560

Tabla 3.13 Datos para configuración de driver y controladora.

De los conocimientos previos en la sección 3.3, es recomendable dividir hasta 16 veces, por lo cual se elige tener una resolución de  $0.1125^\circ = 0.0015\text{mm}$ , asegurando de esta manera un movimiento suave y continuo con una excelente definición en el maquinado, resultados que serán respaldados en el Capítulo 4. Para configurar los parámetros calculados en el driver se tiene un dipswitch con 8 interruptores programables.

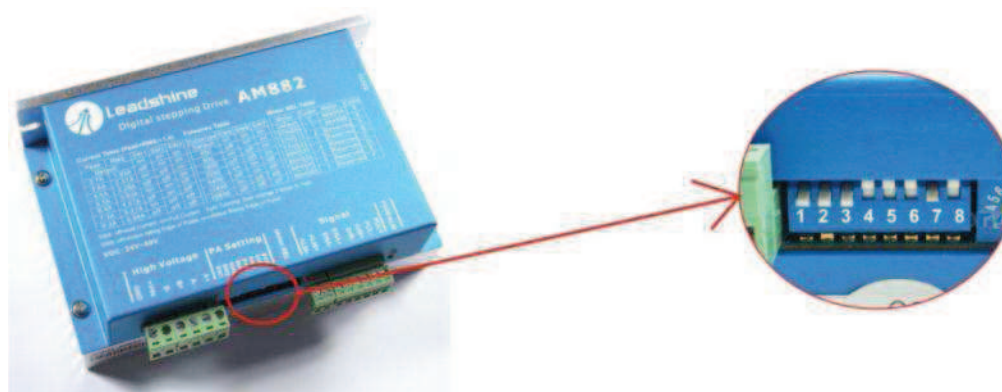


Figura 3.29 Ubicación del dip switch programable, driver AM882.



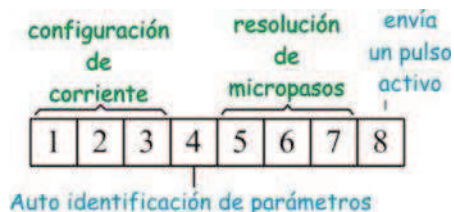


Figura 3.30 Dip switch programable driver AM882.

Los Dipswitch de la Figura 3.30 son configurados de acuerdo a la Figura 3.31.

Microstep	Steps/rev.(for 1.8°motor)	SW5	SW6	SW7
16	3200	ON	ON	OFF
Peak Current	RMS Current	SW1	SW2	SW3
4.6A	3.29A	OFF	OFF	ON

Figura 3.31 Configuración de dipswitch driver AM882.

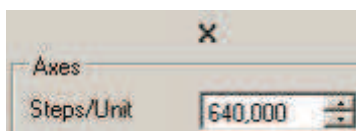


Figura 3.32 Configuración pasos/ unidad eje X en la controladora.

### 3.6.1.2 Configuración de parámetros driver – controladora ejes Y, Z

Se seleccionó el driver 2M880N para cada eje, que de igual manera que el driver del eje X cuenta con entradas opto aisladas por lo que no se requiere de un circuito de acoplamiento para proteger a la controladora.

Para configurar el driver se procede de la siguiente manera:

Los datos de los motores del eje Y, Z previamente seleccionado son:

Motor	Corriente [Amperios]	70% de la corriente nominal [Amperios]
EJE Z (SY85STH80-5504B)	5.5	3.85
EJE Y (SY85STH118-6004B)	6	4.2

Tabla 3.14 corriente de los PAP ejes Y, Z.

La resolución de los motores es de  $1.8^\circ$ , el control se realiza por micropasos por lo que de igual forma al aplicar las ecuaciones Ec. 3.5, Ec. 3.6, Ec. 3.7, Ec. 3.8 se obtiene la Tabla 3.13.

Para configurar los parámetros calculados en el driver 2M880N se tiene un dipswitch con 10 interruptores programables.

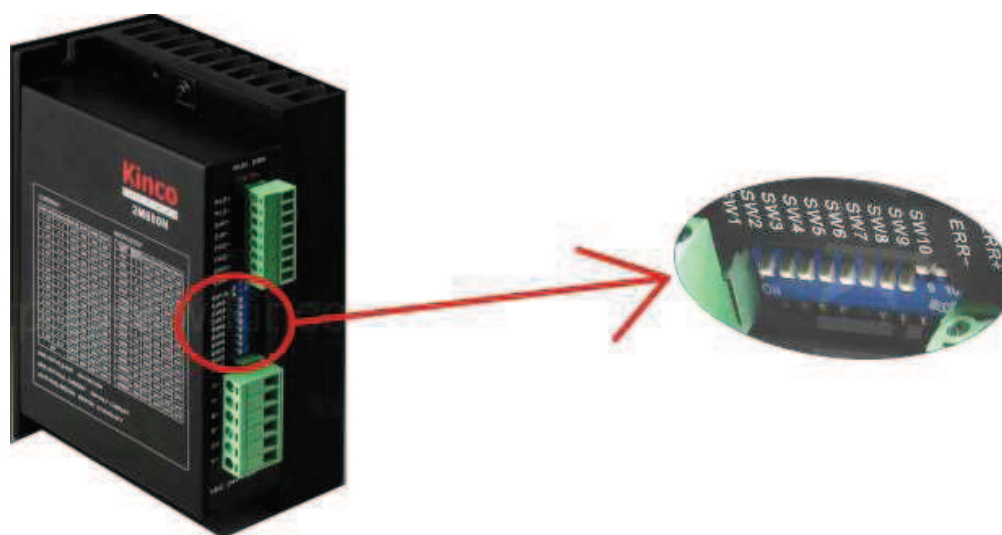


Figura 3.33 Ubicación del dipswitch programable en el driver.

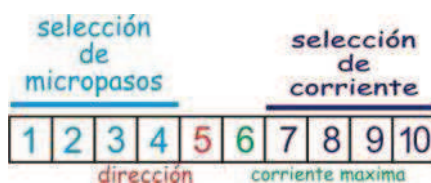


Figura 3.34 Dip switch programable en el driver.

Los dip switch son configurados de acuerdo a la siguiente tabla:

Configuración micro pasos					Configuración de corriente				
Sw1	Sw2	Sw3	Sw4	Eje	Sw7	Sw8	Sw9	Sw10	Eje
On	Off	Off	On	Y	Off	Off	On	On	Z
On	Off	Off	On	Z	On	Off	Off	On	Y

Tabla 3.15 Configuración de los dip switches en los drivers.

Para configurar la controladora se ejecuta el software de control, se abre opciones y configuración de ejes y se coloca el valor calculado de la Tabla 3.13.

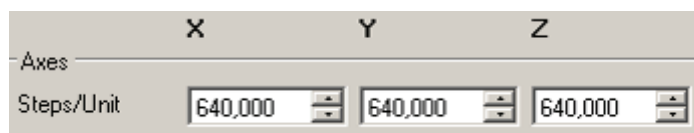


Figura 3.35 Configuración pasos/ unidad eje X, Y, Z.

### 3.6.2 CONEXIÓN DRIVERS – MOTORES PAP - FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Las bobinas de los PAP están identificadas por colores, de acuerdo a la siguiente tabla.

Motor	A+	A-	B+	B-
Eje X	Rojo	Blanco	Amarillo	Verde
Eje Y	Rojo	Blanco	Amarillo	Verde
Eje Z	Rojo	Blanco	Amarillo	Verde

Tabla 3.16 Identificación de las bobinas del PAP.

Cada bobina va a las entradas correspondientes en los drivers de cada eje. Cuando existe errores en la conexión se tienen movimientos erráticos o en dirección contraria con una disminución en el torque.



Figura 3.36 Bornera del driver para alimentación y bobinados.

En la misma bornera se encuentra los dos terminales de alimentación. Para proteger a los drivers se coloca un sistema de protección en la entrada de voltaje (+VDC) conformado por fusibles alojados en bloques porta fusibles para riel din.

Los fusibles seleccionados son Camsco Rt14-20, gG 6 Amperios para el eje X, Y. Para el eje Z se selecciona un fusible de las mismas características con una corriente de 4 amperios.



Figura 3.37 Conjunto fusible – base porta fusible.

Para la instalación de los drivers tiene en cuenta que se requiere de una separación física entre los drivers y la controladora debido a que emiten calor lo cual podría causar el mal funcionamiento de los dispositivos electrónicos, compuestos principalmente por semiconductores que son elementos dependientes de la temperatura.

### 3.6.3 SENSORES DE POSICIÓN DEL SISTEMA

Para evitar que el movimiento de los carros de los ejes X, Y, Z, exceda los límites mecánicos, se requiere un sistema que detenga el movimiento cuando se supera la posición máxima permitida, existen distintos tipos de sensores para esta tarea, que se los puede dividir en:

- Electrónicos.
- Magnéticos.
- Mecánicos.

Se elige los sensores de posición mecánicos conocidos como finales de carrera, debido a la simplicidad del control, excelente precisión, larga vida útil y costo de adquisición e instalación relativamente bajo.

El principio de funcionamiento se basa en el contacto físico del elemento a sensar con la palanca del final de carrera, la cual realiza la conexión o desconexión.

Viene en unidades selladas ya sean metálicas o plásticas, con un grado de especificación IP, que garantiza la protección contra sólidos y líquidos, dejando únicamente expuesto el elemento de accionamiento

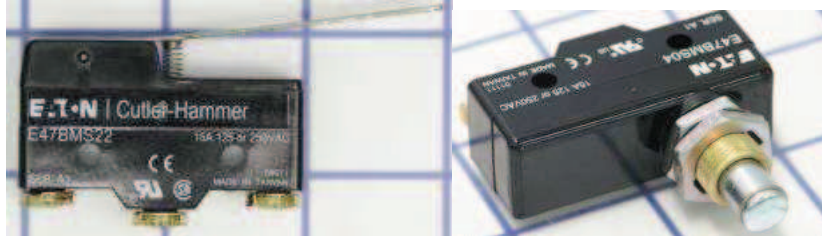


Figura 3.38 Interruptores finales de carrera seleccionados.

### 3.6.3.1 Montaje de los finales de carrera

Para asegurar que el carro del eje Z no sobrepase los límites de diseño se colocan dos finales de carrera en los límites superior e inferior a una distancia de seguridad de 1 cm de los límites mecánicos de movimiento, con lo cual se garantiza que el sistema se detenga antes de superar la barrera de seguridad.

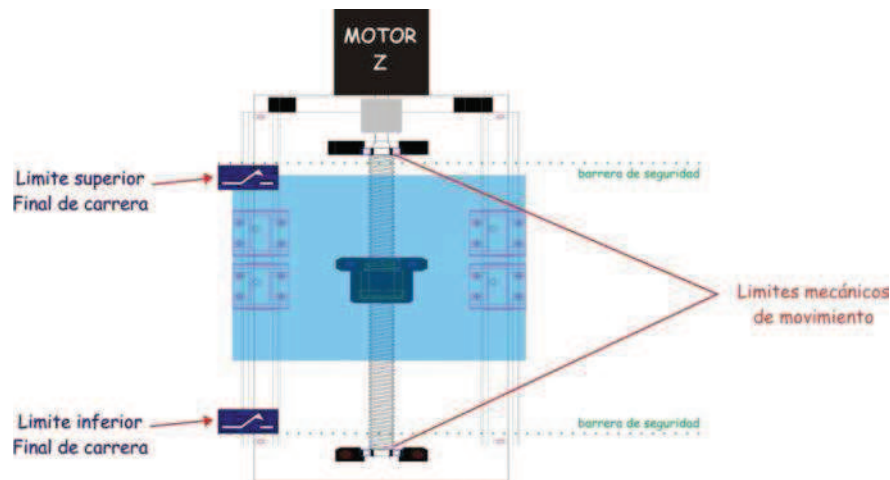


Figura 3.39 Ubicación de los finales de carrera eje Z.

En el eje Y para que el carro no sobrepase los límites de diseño se colocan dos finales de carrera en los extremos izquierdo y derecho a una distancia de seguridad de 1cm de los finales mecánicos de movimiento, con lo cual se garantiza que el sistema se desacelera y detiene antes de superar la barrera de seguridad. En este caso además se debe considerar también las dimensiones físicas del conjunto de movimiento del eje Z.

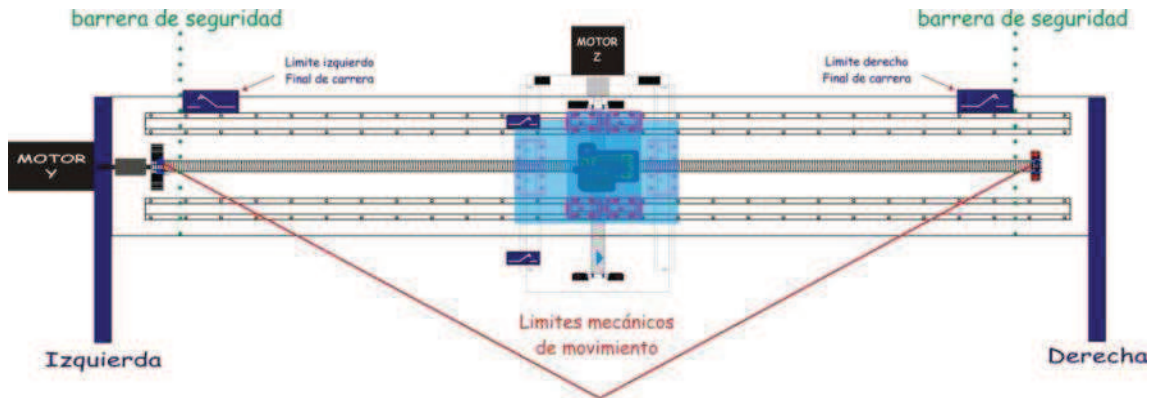


Figura 3.40 Ubicación de los finales de carrera eje Y.

Para el eje X se siguen las mismas consideraciones tomadas para los ejes anteriores y así tenemos:

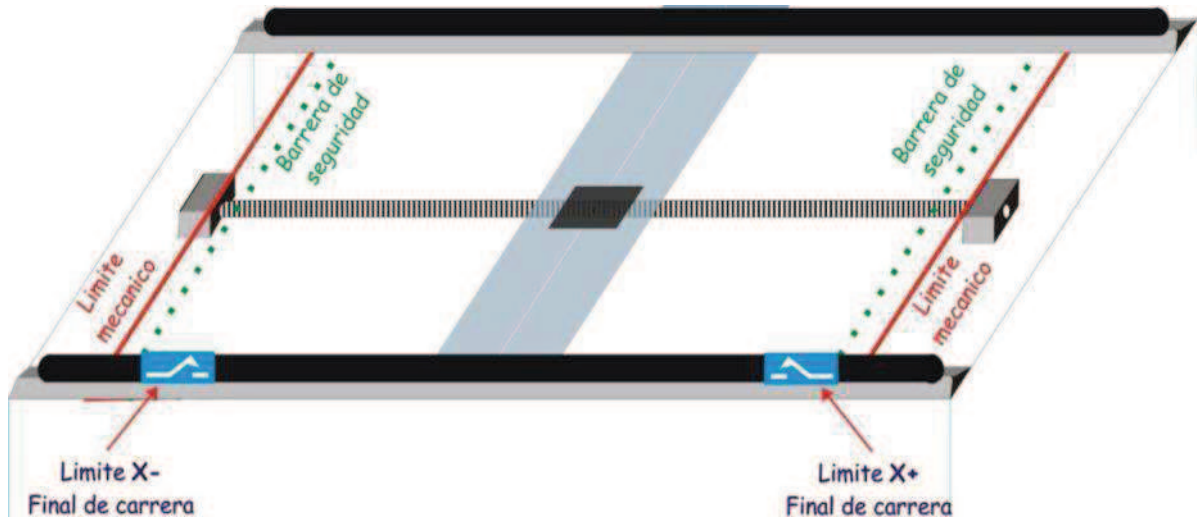


Figura 3.41 Ubicación de los finales de carrera eje X.

### 3.6.3.2 Conexión de los finales de carrera

La conexión se realiza mediante el puerto de la controladora de la Figura 3.42.

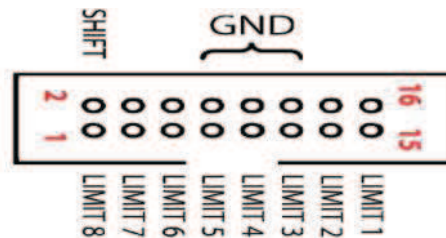


Figura 3.42 Puerto de configuración interruptores.

Para los tres ejes se usa los pines de la controladora LIMIT, de acuerdo a la siguiente tabla:

Eje	Limite positivo	Limite negativo	Gnd
X	Limit 1 (pin 15)	Limit 2 (pin 13)	Pin 14
Y	Limit 3 (pin 11)	Limit 4 (pin 9)	Pin 10
Z	Limit 5 (pin 7)	Limit 6 (pin 5)	Pin 6

Tabla 3.17 Asignación de pines para finales de carrera.

Se establece las dimensiones de la barrera de seguridad para cada eje, es decir se delimita el área donde se puede realizar el mecanizado.

Eje	Límite superior [mm]	Límite inferior [mm]
X	2200mm	0
Y	1120	0
Z	0	200

Tabla 3.18 Área de mecanizado.

Además se puede configurar el tener límites por software, es decir que el sistema no realice el mecanizado cuando se supere los límites previamente establecidos. Sin embargo esta opción se debe activar únicamente cuando el operador tenga establecida correctamente el área de trabajo en el software CAD-CAM.

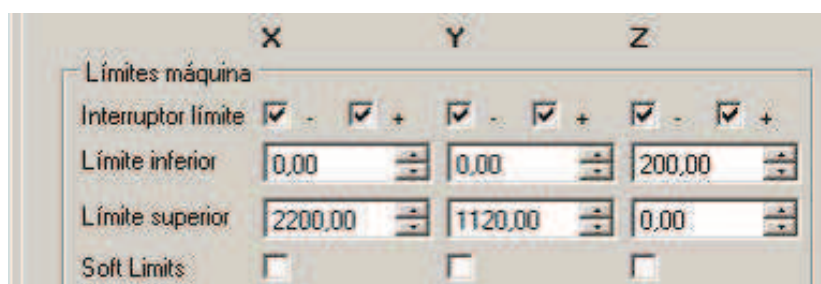


Figura 3.43 Configuración de posición de los finales de carrera

### 3.6.3.3 Posición inicial

Los finales de carrera también cumplen la función de indicar el punto de origen de coordenadas generalmente es el punto (0,0,0), pero puede ser cualquier otro



punto que se adapte mejor al tipo de mecanizado a realizar, para lo cual se debe considerar lo siguiente.

- Definir el orden para alcanzar la posición de origen, considerando la seguridad de la máquina y el operador.
- Establecer la velocidad de avance de cada eje al moverse a la posición inicial.

Para definir el orden se debe tener en cuenta, que el movimiento debe hacerse sobre un plano libre de obstáculos, por lo que es recomendable mover primero el eje Z hasta su máxima posición “altura de seguridad”, donde se asume un plano libre de objetos una vez alcanzada esta posición se podrá mover uno de los dos ejes restantes o los dos a la vez.

La velocidad de avance se configura de acuerdo al recorrido que debe realizar cada eje, tomando en consideración además la longitud del sistema, el movimiento lo realiza en forma libre, es decir sin realizar mecanizado alguno se puede implementar la velocidad de avance de un movimiento rápido para los ejes X, Y, para el eje Z el recorrido es menor por lo que se puede disminuir la velocidad a fin de evitar que el motor acelere o desacelere en forma brusca, En base a las pruebas realizadas esta velocidad puede ser de dos a cinco veces la velocidad de mecanizado.

Finalmente se define que posición es la que se alcanzó y a que posición se desea ir luego de alcanzar este punto la Figura 3.44 muestra la ventana de configuración.

Retorno (Homing)			
Activar	<input checked="" type="checkbox"/>		
Secuencia	2	2	1
Velocidad	1000,00	1500,00	500,00
Dirección	<input checked="" type="radio"/> - <input type="radio"/> +	<input checked="" type="radio"/> - <input type="radio"/> +	<input type="radio"/> - <input checked="" type="radio"/> +
Definir posición	0,00	0,00	0,00
Ir a	0,00	0,00	0,00
Return Distance	5,0000		
Go To First	<input type="checkbox"/>		

Figura 3.44 Configuración de la posición inicial.



### 3.6.3.4 Panel de control

Tiene como objetivo ejercer control sobre el movimiento en los tres ejes, ejecutar, pausar o cancelar el proceso de mecanizado, parar el sistema en caso de emergencia, realizar el encendido y apagado del sistema.

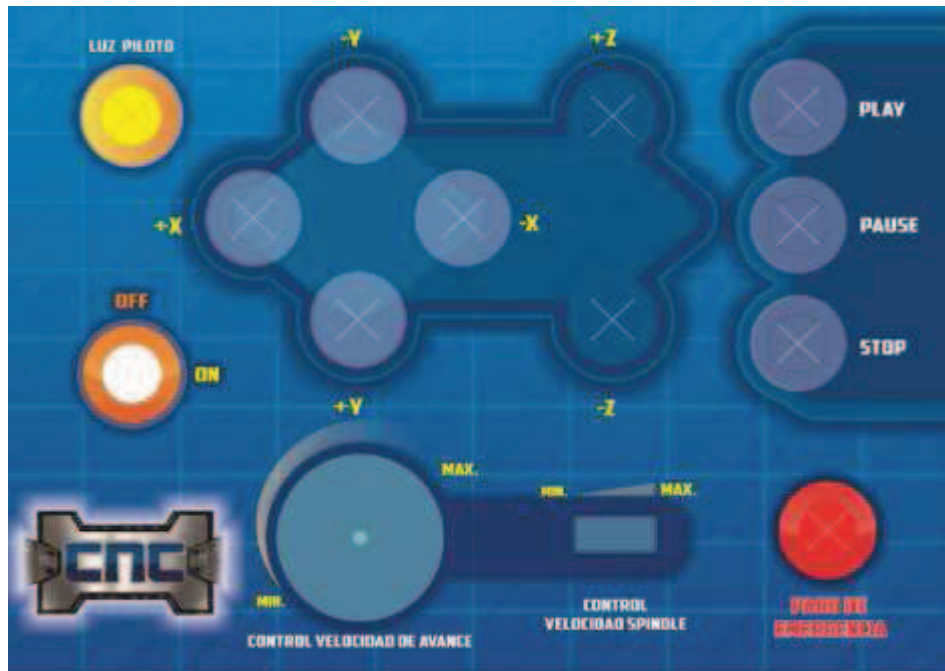


Figura 3.45 Diseño del panel de control.

Los elementos electrónicos usados son:

- **Pulsadores de 30mm**

Son elementos que abren o cierran un circuito, pueden ser normalmente abiertos o cerrados mediante un bloque de contactos, existen también luminosos, el color verde indica avance y generalmente tiene un contacto abierto, mientras que el rojo es paro con un contacto normalmente cerrado.

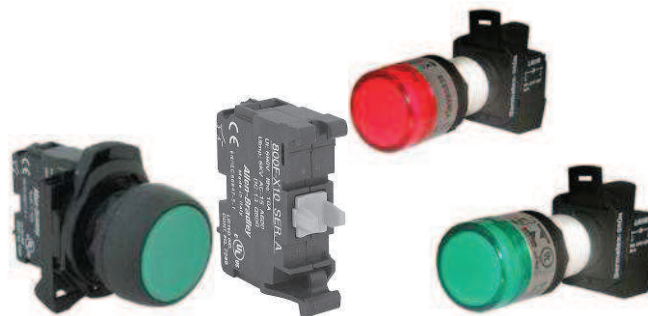


Figura 3.46 Pulsadores 30mm.

- **Botón de paro de emergencia E-Stop**

Es un elemento de seguridad para prevenir accidentes, su activación detiene todo el sistema y solo puede ser restablecido luego de ser desactivado luego de chequear las condiciones para su normal funcionamiento, cuenta con un bloque de contacto normalmente cerrado, además se cuenta con E-stop adicional en el case del centro de mecanizado, de esta manera el operador puede parar el sistema de manera más ágil.



Figura 3.47 Pulsador E-stop.

- **Luz piloto**

Indica el estado actual de la orden o tarea a la que representan. Pueden encontrarse en voltajes de AC con DC, las más usadas en la industria las de 110Vac.



Figura 3.48 Luz piloto.

### 3.6.4 CONTROL DE POSICIÓN MANUAL

Entre las principales funciones del control de posición manual se tiene:

- Mover el spindle dentro del área de trabajo.
- Posicionar el spindle en el punto inicio del mecanizado.
- Mover al spindle para realizar el cambio de herramienta en un lugar diferente al establecido.
- Cortar o grabar siguiendo trazos o planos en el material a mecanizar.

Para implementar estas funciones se emplean pulsadores de 30mm, con contactos normalmente abiertos, conectados al puerto de la controladora, siguiendo la Figura 3.49 y la Tabla 3.19.

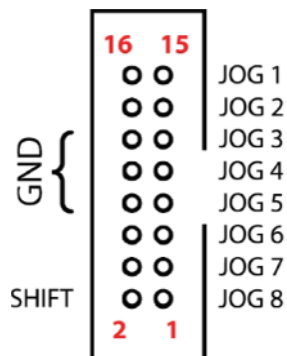


Figura 3.49 Puerto para posicionamiento manual.

Eje	Dirección positiva	Dirección negativa	Gnd.
X	Jog1 (pin15)	Jog2 (pin13)	Pin 14
Y	Jog3 (pin11)	Jog4 (pin9)	Pin 10
Z	Jog5 (pin7)	Jog6 (pin5)	Pin 6

Tabla 3.19 Asignación de pines posicionamiento manual.

El pin shift se debe utilizar para mover los ejes complementarios, en caso de que se aumenten grados de libertad al sistema.

Para controlar la velocidad de avance manual se coloca un potenciómetro de 10K $\Omega$  a los terminales POT de la controladora Mk2, a continuación se presenta un ejemplo de conexión.



Figura 3.50 Ejemplo conexión a la controladora del posicionamiento manual.

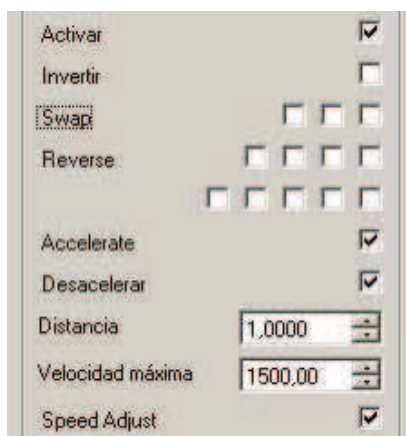


Figura 3.51 Configuración del posicionamiento manual.

En la controladora se activa el posicionamiento, la función de invertir se usa cuando los pulsadores son normalmente cerrados, se configura además la distancia que avanza por un pulso recibido y el rango de variación de velocidad como lo muestra la Figura 3.51.

#### 3.6.4.1 Control de proceso de mecanizado mediante el panel de control

Esta función permite controlar el inicio, pausa y paro de una tarea de mecanizado, además se cuenta con el botón de E-stop, el puerto usado se describe a continuación:



Figura 3.52 Puerto para entradas de control.

Eje	Entrada	Gnd
Pause	Pin 9	Pin 10
Play	Pin 7	Pin 8
Stop	Pin 5	Pin 6
E-stop	Pin 3	Pin 4
Sensor de herramienta	Pin 1	Pin 2

Tabla 3.20 Asignación de pines para control del proceso

Se tiene una función adicional para determinar la longitud de fresa o broca del spindle, distancia “d” de la Figura. 3.53, a esta función se la conoce como sensor de herramienta.

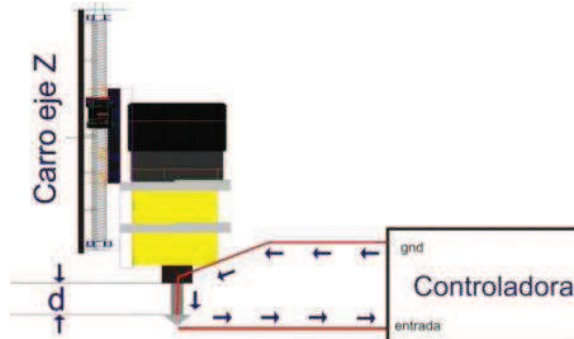


Figura 3.53 Sistema del sensor de herramienta.

Para el sensor se utiliza un contacto normalmente abierto el mismo que al detectar la herramienta en forma física, cierra el circuito, enviando la señal de tierra a la controladora.

Para las funciones de Play, Pause, Stop se utilizan pulsadores de 30mm con luz indicadora de 110 Vac, cada pulsador tiene únicamente un bloque de contactos por lo que se requiere de un circuito adicional para poder trabajar con la señal de la controladora y la señal de 110Vac.

El circuito de acoplamiento para las luces indicadoras es el siguiente:

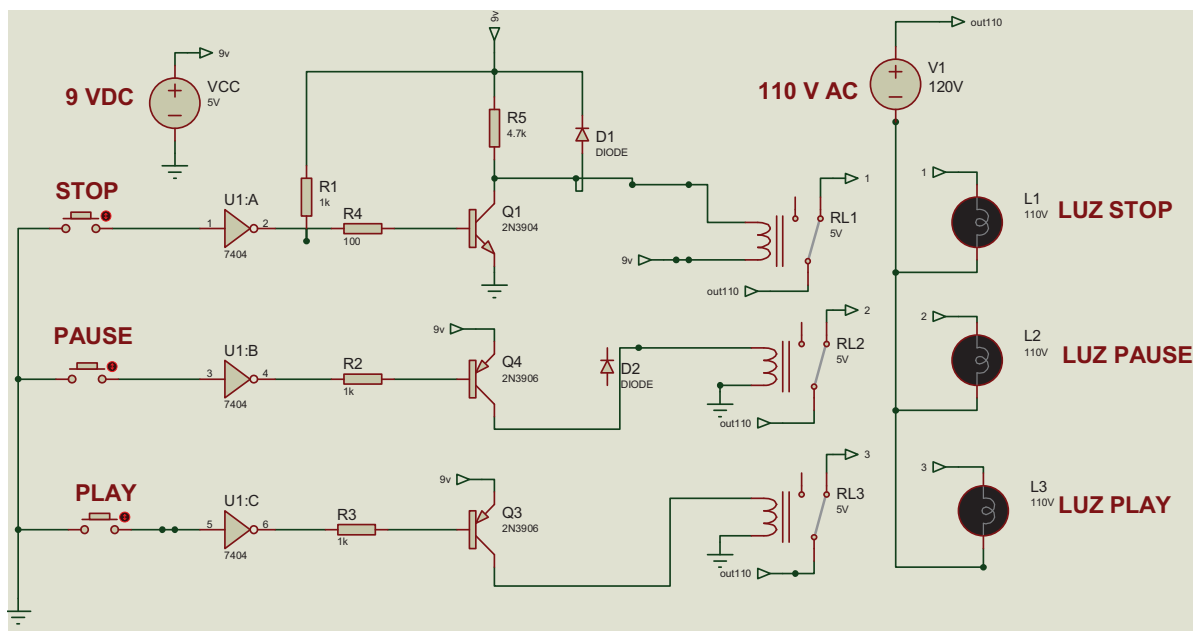


Figura 3.54 Circuito de encendido de luces indicadoras.

El estado lógico que requiere la controladora para ser activada es de cero lógico que sucede cuando se cierra el contacto del pulsador, cuando está abierto la entrada permanece en un estado de alta impedancia.

La señal del pulsador va a la controladora directamente, pero para el circuito de encendido se requiere definir esta señal para que tenga los dos niveles lógicos de 0L y 1L, por lo cual se usa un IC. TTL 74ls04, que contiene compuertas not, las cuales le dan un nivel lógico a la salida de 1L cuando se cierra un contacto y de 0L cuando se abre un contacto. El consumo de una compuerta not es de 1mA [34] por lo que no se sobrecarga a la controladora la cual tiene una capacidad de corriente de 200mA [23].

Una vez definida la señal se diseña el circuito de potencia para activar el relé, mediante un transistor trabajando en corte y saturación.

Para que un transistor trabaje en la región de saturación la juntura  $J_{CB}$  debe estar en polarización directa, el límite para entrar a la región de saturación es cuando  $V_{CB} = 0$

Por lo que  $V_{BE} = V_{CE}$ .

La corriente mínima de la base para entrar en saturación es:

$$I_{B(sat)minima} = \frac{I_C(sat)}{\beta} \quad \text{Ec. 3.9}$$

$$I_C(sat)minima = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C} \quad \text{Ec. 3.10}$$

Para garantizar que el transistor entre en la región de corte y saturación se debe sobredimensionar la  $I_{B(sat)minima}$  mediante un factor es conocido como ODF.

$$ODF = \frac{I_B}{I_{B(sat)minima}} \quad \text{Ec. 3.11}$$

De la hoja de datos del transistor [35], se tiene:

$$V_{CE(sat)} = 0.2 V ,$$

$$\beta = 100 ,$$

$$V_{BE(sat)} = 0.85 V$$

Sea  $V_{CC} = 9V$ ,  $R_c = 4.7K\Omega$  y  $ODF = 2$

Resolviendo se tiene:

$$I_{C(sat)minima} = \frac{9V - 0.2V}{4.7K} = 1.87mA$$

$$I_{B(sat)minima} = \frac{1.87mA}{100} = 0.0187mA$$

$$R_B = \frac{V_{be}}{I_{B(sat)minima}} \quad \text{Ec. 3.12}$$

$$R_B = \frac{0.85V}{0.0187mA} = 65\Omega \quad \text{Por lo que se elige una resistencia de } 68\Omega$$

Para poder encender y apagar las luces se usa un relé de 5V en la bobina y de 110VAC en los contactos.

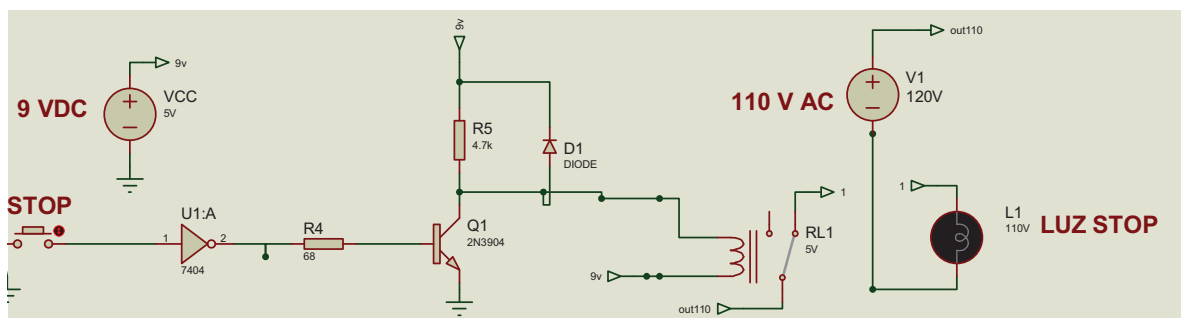


Figura 3.55 Circuito de encendido luz stop.

Para el circuito de Stop se tiene un pulsador normalmente cerrado, esto debido a condiciones de seguridad, para los pulsadores de Play, Pausa se usan pulsadores normalmente abiertos, por este motivo se realiza el circuito en forma análoga pero usando el transistor 2n3906. Se debe además unir la tierra de la controladora con la tierra que alimenta el circuito de encendido.

El pulsador del paro de emergencia es tipo hongo, con un contacto normalmente cerrado, por condiciones de seguridad, ya que se puede detectar fallas en el pulsador o en las conexiones eléctricas.

Entrada	
Invert Input 1	<input type="checkbox"/>
Invert Input 2	<input type="checkbox"/>
Invert Input 3	<input checked="" type="checkbox"/>
Invert Input 4	<input checked="" type="checkbox"/>
Invert Input 5	<input type="checkbox"/>
Use Pause	<input checked="" type="checkbox"/>
Use Start	<input checked="" type="checkbox"/>
Use Stop	<input checked="" type="checkbox"/>
Use EStop	<input checked="" type="checkbox"/>
Use Tool Sensor	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 3.56 Configuración de entradas de control de proceso

### 3.6.5 CONTROL DE ENCENDIDO Y APAGADO DEL SPINDLE

Permite realizar el encendido o apagado del spindle, ya sea por activación directa mediante el icono de cabezal en el software o mediante código ingresado, así se tiene que el modal M3 hace girar el spindle en sentido horario, el modal M5 detiene y apaga al spindle.



Figura 3.57 Icono de encendido y apagado del spindle.

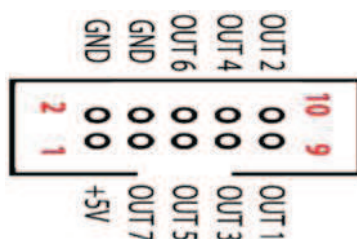


Figura 3.58 Puerto de salidas de control.

Eje	Salida	Gnd	Vcc
Control de Spindle	Out1(pin9)	Pin 10	Pin 1

Tabla 3.21 Asignación para control del spindle.

Para diseñar el circuito de control se toma en cuenta los siguientes aspectos:

Al activar la salida1 se tiene el siguiente voltaje:

- Salida1 en On = 5 Voltios.
- Salida1 en Off = 0.11 Voltios.
- El spindle está activado durante todo el proceso de mecanizado, por lo que el circuito debe soportar largos periodos de funcionamiento continuo.
- Se debe tener un aislamiento entre la controladora y el circuito de control de spindle.



- La corriente máxima de salida en controladora es de 15mA [23].

Se opto aísla la salida de la controladora del circuito de control mediante dos etapas la primera conformada por el opto transistor 4N25 y la segunda por un opto triac MC3021.

Diseño:

$$I_{Ra} = 15mA, V_{out1} = 5V \text{ y } V_{DIODO(4N25)} = 1.5V \quad [36]$$

$$V_{Ra} = V_{out1} - V_{DIODO(4N25)} \quad \text{Ec. 3.13}$$

$$V_{Ra} = 5V - 1.5V = 3.5V$$

$$Ra = \frac{V_{Ra}}{I_{Ra}} \quad \text{Ec. 3.14}$$

$$Ra = \frac{3.5V}{15mA} = 233.33\Omega$$

Por lo que se asume Ra mucho mayor a este valor a fin de limitar la corriente. Se elige Ra=1KΩ.

$$I_{Ra} = \frac{V_{Ra}}{Ra} = \frac{3.5V}{1K\Omega} = 3.5mA$$

Para calcular R1 se busca la corriente necesaria para activar el diodo del MOC3021 en el datasheet, la cual es de 10mA a un voltaje de 1.5V [37].

Por lo que se tiene usando las Ec. 3.13 y Ec. 3.14 se tiene:

$$V_{R1} = V1 - V_{DIODO(MOC3021)}$$

$$V_{R1} = 5V - 1.5V = 3.5V$$

$$R1 = \frac{V_{R1}}{I_{R1}}$$

$$R1 = \frac{3.5V}{10mA} = 350\Omega$$

Se elige R1= 470Ω.

Para el circuito de potencia se utiliza un relé de estado sólido conformado por un triac BTA06 600c diseñado para soportar hasta 6 Amperios se añade un disipador de calor evitando que el triac sea afectado por el aumento de temperatura.

La siguiente figura muestra el circuito donde se simboliza a la bobina del contactor que activara el spindle como la lámpara L1.

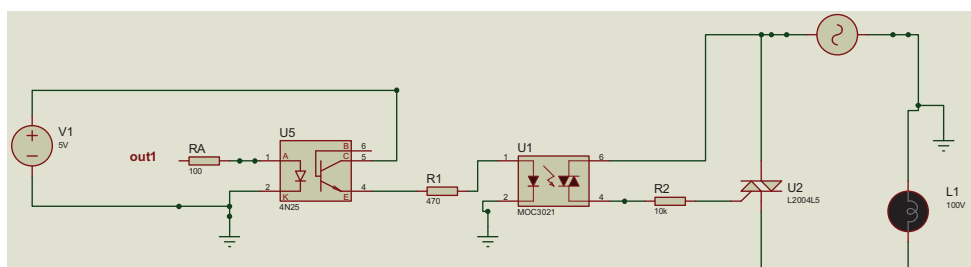


Figura 3.59 Circuito de control de spindle.

### 3.6.6 CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN

Se conforma de los siguientes elementos:

#### 3.6.6.1 Disyuntor principal

Sirve para proteger la el circuito de control y potencia contra sobre corrientes.



Figura 3.60 Disyuntor Schneider Electric Dom4A C16.

La carga del sistema es la siguiente:

Carga	Consumo de Corriente Línea 1	Consumo de Corriente Línea2
Fuente de alimentación Drivers PAP	12.5 A	-
Fuente de alimentación Controladora CNC	400mA	-
Fuente de alimentación Panel de control	800mA	-
Spindle (fresa)	-	15 <sup>a</sup>
TOTAL	13.7 A	15 A

Tabla 3.22 Cuadro de cargas del sistema

De la tabla 3.23 se selecciona un disyuntor de 2 polos, 16 Amperios, para montaje sobre riel din. Para encender todo el sistema se utiliza un interruptor con llave, asegurándose de esta manera que solo personal autorizado pueda operar el centro de mecanizado.



Figura 3.61 Interruptor con llave.

Para energizar los circuitos se utiliza dos contactores de 18 Amperios, AC3, para cada línea.



Figura 3.62 Contactor LS, 3polos, 18 amperios, AC3.

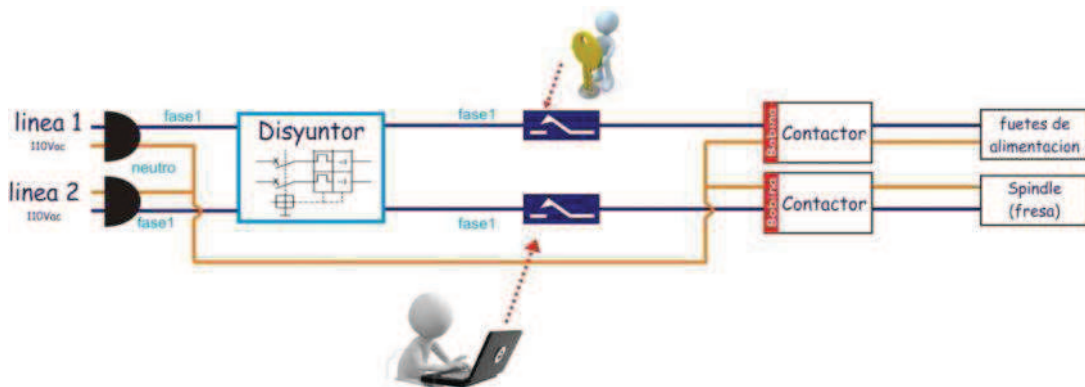


Figura 3.63 Esquema del sistema de potencia.

### 3.6.7 TRATAMIENTO DE INTERFERENCIAS

La interferencia electromagnética es una de las causantes de errores en el sistema, traducida en pérdida de información, debido a la sensibilidad a ruidos eléctricos generados por los componentes activos como lo son los motores y el spindle. Para eliminar los posibles problemas se adoptan las siguientes medidas.

### 3.6.7.1 Filtros Bypass [38]

Un filtro bypass está formado por un capacitor el cual elimina la componente AC de una señal hacia tierra y deja pasar la señal DC.

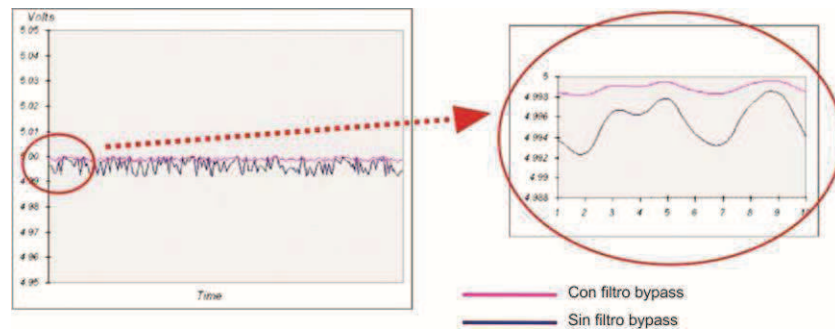


Figura 3.64 Señal con y sin ruido.

En la Figura. 3.64 se representa una señal de color negro sin filtro bypass y la señal de color rosa es la misma después de pasar por un filtro bypass.

El ruido eléctrico hace que la señal digital se comporte en forma oscilatoria lo que trae como consecuencia la interpretación errónea de la información.

Para evitar este problema se colocan capacitores de 0.1uF entre los pines de entrada de la controladora y gnd. Los filtros bypass son colocados en un circuito impreso bajo el esquema de la Figura 3.65.

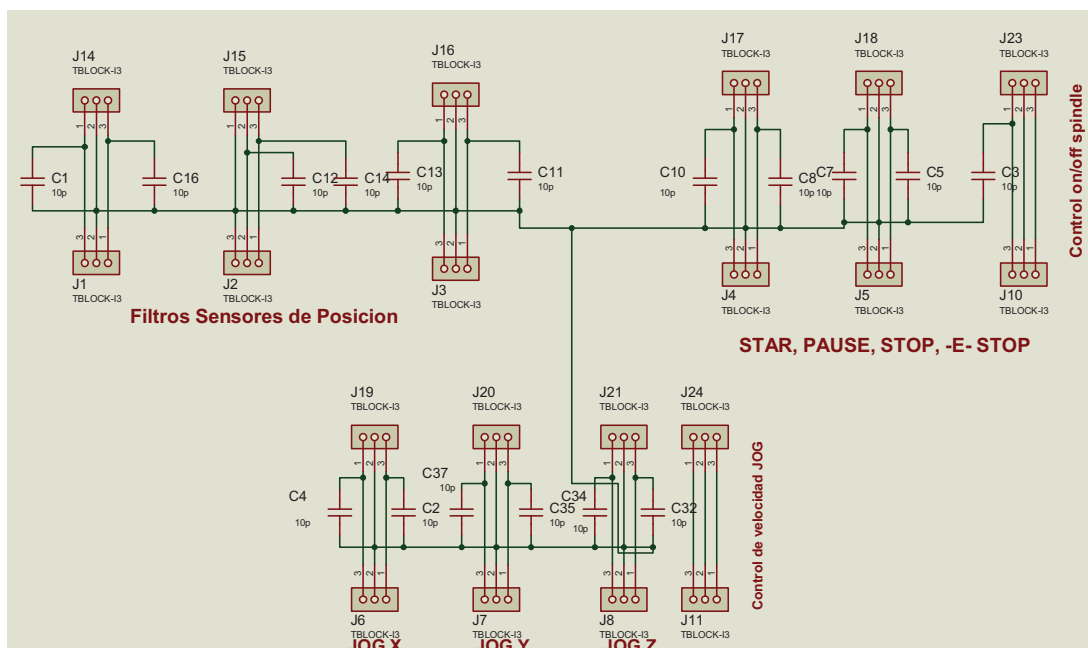


Figura 3.65 Filtros bypass a las entradas de la controladora.

### 3.6.7.2 Cableado

Como primera medida para eliminar la interferencia se realiza el cableado de las señales de potencia separados de las señales de control, ya que los efectos de la interferencia electromagnética o EMI son directamente proporcionales al área de contacto e inversamente a la distancia que separa la fuente de ruido de los cables de señal.

- Se utiliza cable con blindaje conectado en un único punto a tierra, con esto se consigue el efecto de jaula de Faraday eliminando la posibilidad de EMI. Los cables seleccionados son: cable de mando PVC CF130.07.12.UL y cable de mando PVC CF140.25.04.UL

Los cuales tienen la característica de ser súper flexibles ideales para aplicaciones con movimiento continuo.



Figura 3.66 Cable CF140 Igus.

Además se usa conductores tipo par trenzado para llevar señales discretas como las de sensores de posición o pulsadores.

Se adoptan únicamente estas medidas teniendo en cuenta que la fuente de alimentación Mean Well cuenta con filtros y protecciones para evitar la EMI.

### 3.6.8 TABLERO DE CONTROL ELÉCTRICO

El tablero de control contiene a los componentes electrónicos de control, potencia y alimentación, con excepción del panel de control. Se utiliza un tablero metálico doble fondo de 60cm de alto, 40 cm de ancho y 30 cm de profundidad, va conectado a tierra.

Cuenta con una entrada y una salida de aire por medio de ventiladores, asegurando que todos los elementos trabajen a la temperatura ambiente.

### 3.6.9 CADENA PORTA CABLES



Figura 3.67 Cadena porta cables.

La cadena porta cables se utiliza para organizar el cableado en las partes móviles del sistema, como protección en los puntos de flexión evitando que se doblen y rompan los conductores. Además le da una apariencia profesional y organizada al centro de mecanizado CNC.

### 3.7 HERRAMIENTA DE MECANIZADO O SPINDLE

Constituye la herramienta que realiza la acción de mecanizado sobre la materia prima, está conformada por un motor acoplado a un sistema de boquilla para la fresa. Las características principales que debe poseer son:

- Control de velocidad.
- Potencia.
- Capacidad para trabajo prolongado.
- Posibilidad de usar varios diámetros de fresas.

Por lo cual se selecciona la rebajadora Dewalt 625 E de la Figura 3.68.

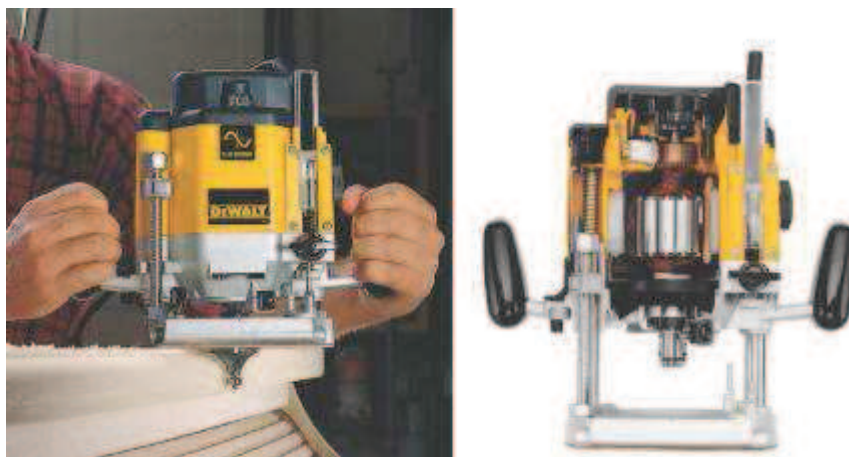


Figura 3.68 Dewalt 625 E.

Las principales características se resumen a continuación:

- Potencia del motor 3HP.
- Motor de 15 Amp con arranque suave y compensador de velocidad que le permite mantener la misma velocidad en vacío o a plena carga.
- Control electrónico de velocidad variable de 8.000a 22.000 rpm por lo que es apta para trabajar sobre todo tipo de material.
- Bujes de bronce fosforado para un hundimiento más suave de la fresa
- Boquillas para fresas de 1/4" a 1/2".

Para aumentar la compatibilidad con distintos diámetros de fresas se le añade un mandril de taladro ajustable de 1 mm a 6.35 mm.

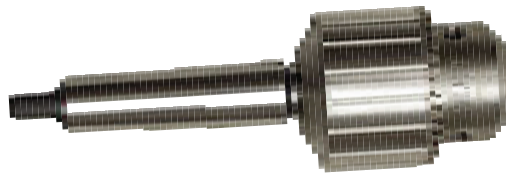


Figura 3.69 Mandril para boquilla de 1/2".



Figura 3.70 Fresas o router bits.

Existen en el mercado distintos tipos de fresas cada una para una aplicación en especial, por lo que se debe elegir la más adecuada, del diámetro depende la resolución y velocidad del mecanizado.



### 3.8 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO

La primera prueba realizada al sistema de control es comprobar que los motores responden a las señales de control por medio de los drivers, para esto se considero los motores sin cargar trabajando a un 70% de la corriente nominal.



Figura 3.71 Pruebas iniciales.

Con esta primera prueba se tuvo como resultado la confirmación de los datos calculados en forma teórica para valores de resolución y corriente, además de las configuraciones del software de control.

Una vez establecidos que los elementos dimensionados cumplen las condiciones de diseño, se los ubico en el tablero electrico.

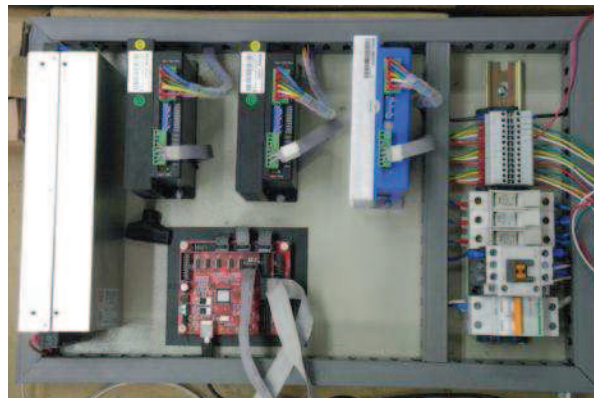


Figura 3.72 Tablero eléctrico inicial.

La Figura 3.72 muestra el tablero en su primera etapa, incluye los tres drivers, la fuente de alimentación, las protecciones y un contactor para el encendido. Por lo que se comenzó con las pruebas con los motores con carga montados en la estructura metálica obteniendo los resultados de la sección 4.1.

El sistema electrónico fue puesto a prueba al integrarse por completo al sistema mecánico, se usaron conductores y finales de carrera sustitutivos ya que el objetivo es verificar su operación y en base a estos resultados aceptar o modificar el diseño tratado en los capítulos anteriores.

Las primeras pruebas ayudan a elegir la mejor ubicación para los finales de carrera y panel de control, definieron la importancia de la protección mecánica y eléctrica al cableado, permitiendo llegar al diseño final el cual es un sistema seguro y técnicamente confiable.

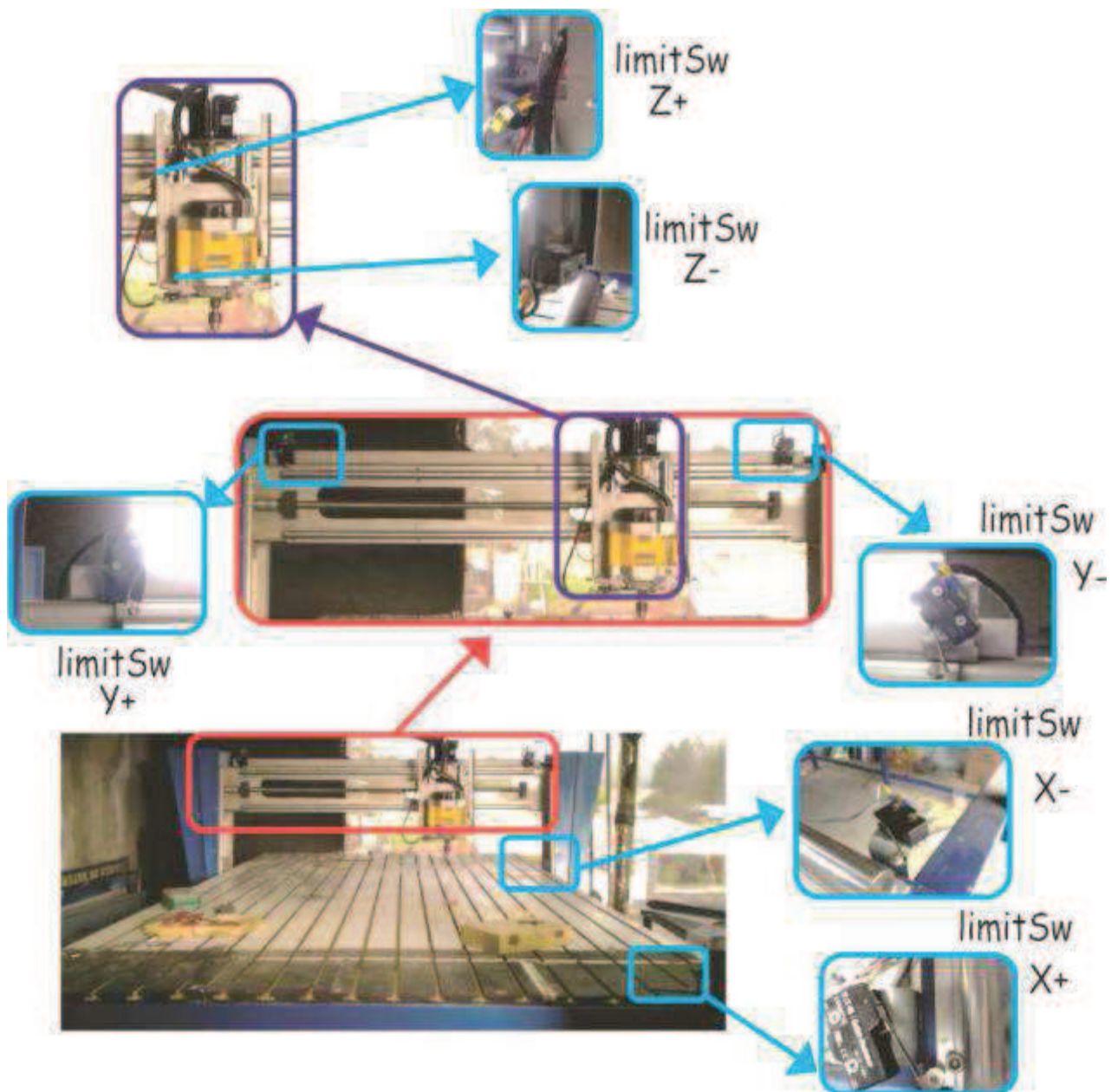


Figura 3.74 Finales de carrera.

Como se puede observar en la Figura 3.74 cada uno de los finales de carrera está instalado antes del límite de movimiento de cada eje, garantizando que no se sobrepase la barrera de seguridad.

El panel de control para el mando manual implementado es el siguiente:



Figura 3.75 Panel de control.

Como se puede apreciar en la Figura 3.75, el panel de control está formado por pulsadores para el control de posición y señales de control de: mecanizado, velocidad de avance, velocidad del spindle, un botón de paro de emergencia, el interruptor con llave y la luz piloto para el encendido y apagado.

Para proteger al cableado en las partes móviles se colocó dentro de cadena porta cables como muestra la Figura 3.76.

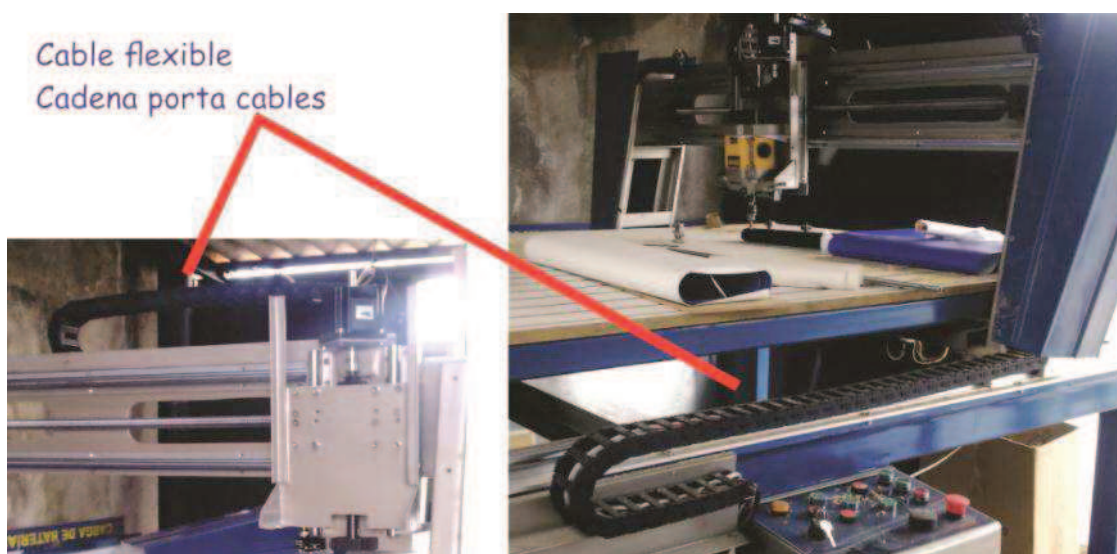


Figura 3.76 Conjunto cable – cadena partes móviles.



Una vez realizadas las pruebas de operación bajo distintas condiciones de maquinado se procedió a ajustar, calibrar parámetros mecánicos y electrónicos por lo que el centro de mecanizado implementado en su fase final es el siguiente:



Figura 3.77 Tablero de control final.

La Figura 3.77 muestra el tablero de control electrónico implementado, conformado básicamente por la atapa de potencia, la etapa de control, fuentes de alimentación, dos ventiladores. La distribución de elementos, conexiones eléctricas se muestran en el anexo A.



Figura 3.78 Centro de mecanizado CNC vista frontal.

### 3.9 HMI INTEGRACIÓN CAD- CAM – CNC

Se integra los distintos programas requeridos para el diseño, simulación y maquinado CNC en una sola aplicación, permitiéndole una fácil y ágil operación. El diseño se lo realiza usando Visual Basic 2010, Las etapas a seguir son las siguientes:

- Presentación
- Identificación de usuario
- Ventana con listado de programas
- Cerrar aplicación

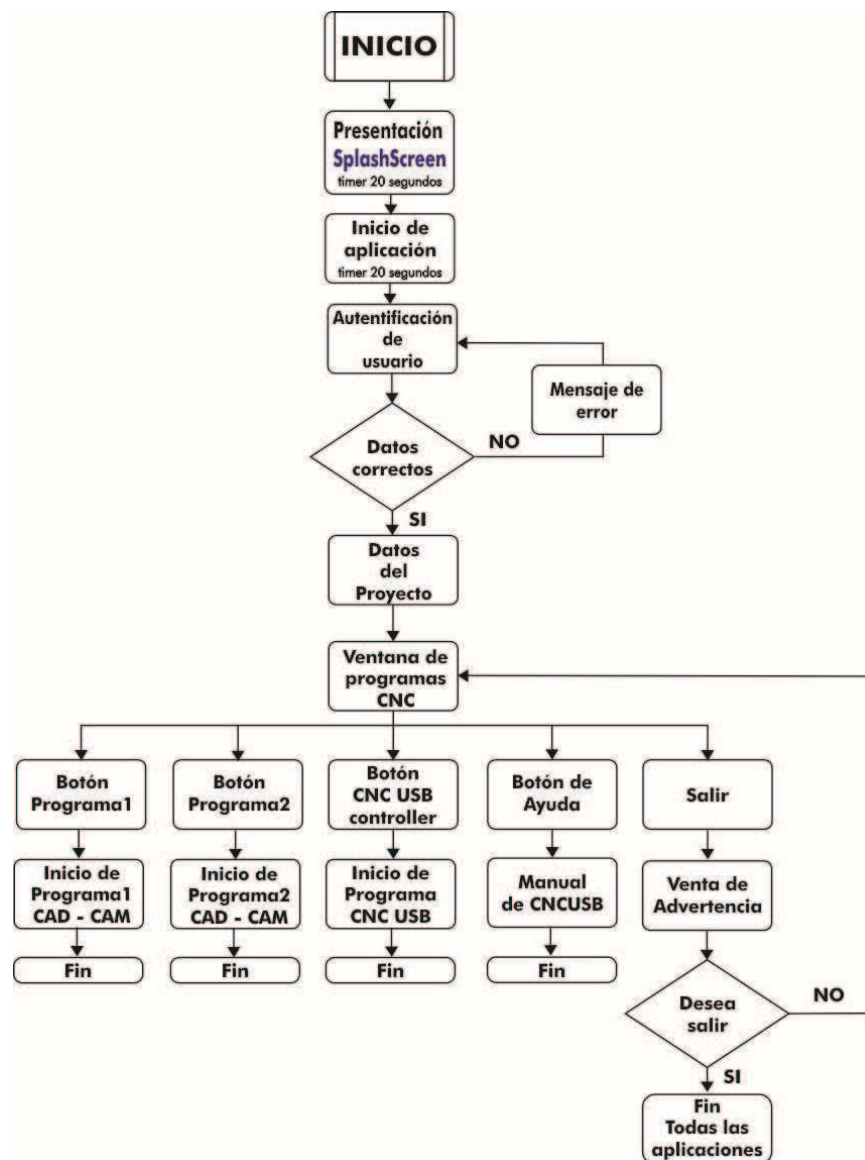


Figura 3.79 Diagrama de flujo de información en el HMI.

### 3.7.1 PRESENTACIÓN

La presentación (Figura 3.80) se la realiza por medio de la función Splashscreen de visual basic, contiene los datos y logotipo de la Escuela Politécnica Nacional, nombre del proyecto de titulación, versión, fecha, más una barra de carga de aplicación conformada por un timer.



Figura 3.80 Splashscreen.

### 3.7.2 INICIO DE APLICACIÓN



Figura 3.81 Ventana para cargar la aplicación.

El inicio de la aplicación se realiza con una imagen GIF que simula el movimiento del spindle al realizar el mecanizado, mientras se inicia un contador que determinara el proceso de carga.

### 3.7.3 AUTENTIFICACIÓN DE USUARIO

Con esta ventana se permite el ingreso solo a personal autorizado, autenticándolo mediante el ingreso de un nombre de usuario y una contraseña (Figura 3.82), cuando son correctos se va a la siguiente etapa caso contrario se muestra un mensaje de error (Figura 3.83).

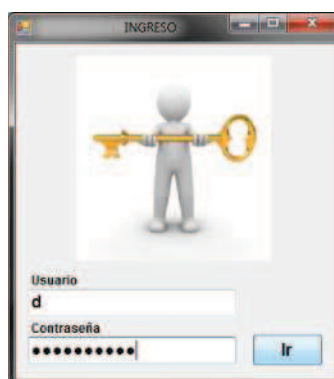


Figura 3.82 Ventana de ingreso.

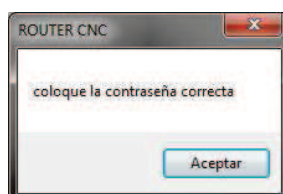


Figura 3.83 Mensaje de error.

### 3.7.4 DATOS DEL PROYECTO

En esta ventana se presentan los datos del proyecto, el logo y nombre de la Escuela Politécnica Nacional, autor y director.



Figura 3.84 Datos del proyecto.



### 3.7.5 VENTANA DE PROGRAMAS CNC



Figura 3.85 Aplicaciones CNC.

La ventana de aplicaciones CNC se tiene dos botones iniciales configurables para abrir dos software CAD – CAM elegidos por el usuario, el tercer botón abre la aplicación CNC USB Controller, el cuarto botón de ayuda muestra el manual de usuario y el quinto cierra la aplicación.

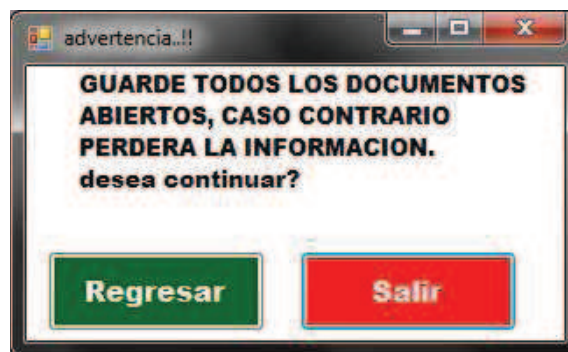


Figura 3.86 Advertencia para cerrar aplicación.

Al presionar salir se muestra una ventana adicional (Figura 3.86), advirtiendo que se deben guardar todos los cambios antes de cerrar la aplicación, el usuario decide si cierra o regresa a la ventana anterior.



## CAPÍTULO IV

### PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se describen las pruebas y resultados obtenidos por el centro de mecanizado CNC sobre la materia prima.

#### 4.1 PRIMEROS RESULTADOS

La primera prueba al centro de mecanizado se realizó con un esfero sujeto al carro del eje Z, el cual rayaba sobre el material colocado en la mesa de trabajo, siguiendo la trayectoria definida por el software CAM-CAD.

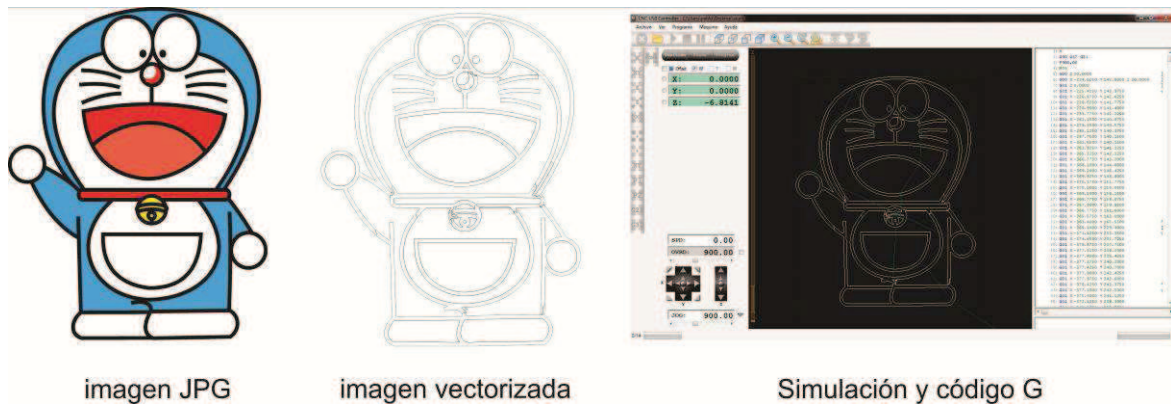


Figura 4.1 Proceso CAD – CAM – post procesador.

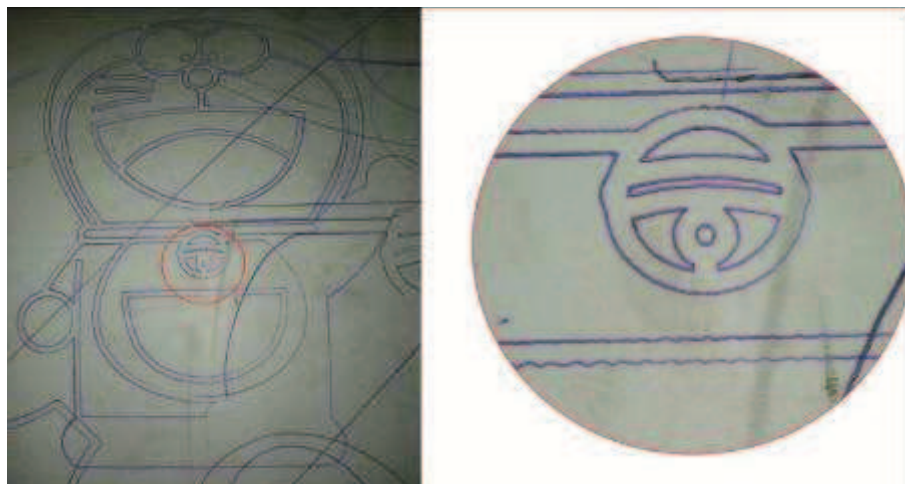


Figura 4.2 Mecanizado sobre una superficie rígida.

Como se puede apreciar en la Figura 4.2 en la primera prueba realizada se tienen los siguientes problemas:

- **Excesiva vibración**

La vibración produce pérdida de definición, transformando contornos definidos en líneas zigzagueantes, para corregir este problema se calibró a todo el sistema a una velocidad menor y se redujo la aceleración y desaceleración, además que se usaron empaques en los todos los acoples del eje X por ser el más afectado.

Otro efecto de la vibración es el desajuste de los pernos, en este caso se requiere el uso de rodela de presión más traba pernos, sin embargo el sistema debe ser periódicamente revisado.

- **Desnivel de mesa**

El desnivel se produce cuando el plano que conforma la mesa (XY) no se encuentra a la misma distancia del spindle en todos los puntos, lo que origina como problema diferencia de altura en el mecanizado. Este problema puede ser corregido al momento de ensamblar el centro de mecanizado, realizando la correcta calibración de altura en todos los puntos de la mesa, depende además que el material colocado este completamente paralelo a la mesa.

## 4.2 RESULTADOS FINALES

En base a las primeras pruebas y tomados las respectivas acciones correctivas para eliminar o disminuir los defectos, los resultados obtenidos son los siguientes:

### 4.2.1 CORTE SOBRE MDF Y ACRÍLICO



Figura 4.3 Proceso CAD – Post procesador.



Figura 4.4 Corte sobre MDF de 6mm de espesor.



Figura 4.5 Corte sobre acrílico de 4mm de espesor.

Como se puede apreciar en la Figura 4.4 y 4.5 se realiza el corte sobre materiales rígidos, el procedimiento es el mismo para cualquier superficie, pero se debe calibrar la velocidad de avance y del spindle para cada caso.

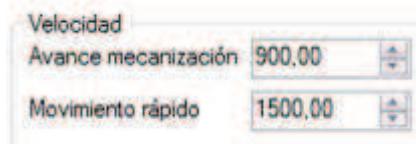


Figura 4.6 Ventana de configuración de velocidades.

La Figura 4.6 muestra la configuración de velocidades, está en unidades/ minuto, por ejemplo la velocidad de avance mecanización es de 900, como se trabaja con milímetros se tiene:

$$\text{Velocidad de mecanización} = \frac{900 \text{ milímetros}}{1 \text{ minuto}} = 90 \text{ [cm/ min]} = 1.5 \text{ [cm/s]}$$

El paso del tornillo de bolas re-circulantes es de 5mm por lo que la velocidad de rotación de los motores PAP es de:

$$\text{Velocidad}_{\text{Motor PAP}} = \frac{900 \text{ mm}}{\text{min}} \times \frac{1}{5 \text{ mm}} = 180 \text{ [rpm]}$$

#### 4.2.2 GRABADO

El proceso de grabado consiste en desbastar la superficie siguiendo la trayectoria de mecanizado.

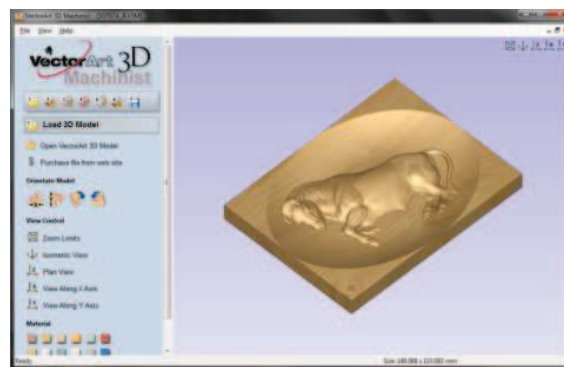


Figura 4.7 diseño CAD - CAM toro 3d.



Figura 4.8 Proceso de grabado sobre madera 20mm.



La Figura 4.8 muestra la simulación con el código G (a), y el resultado de la mecanización (b).

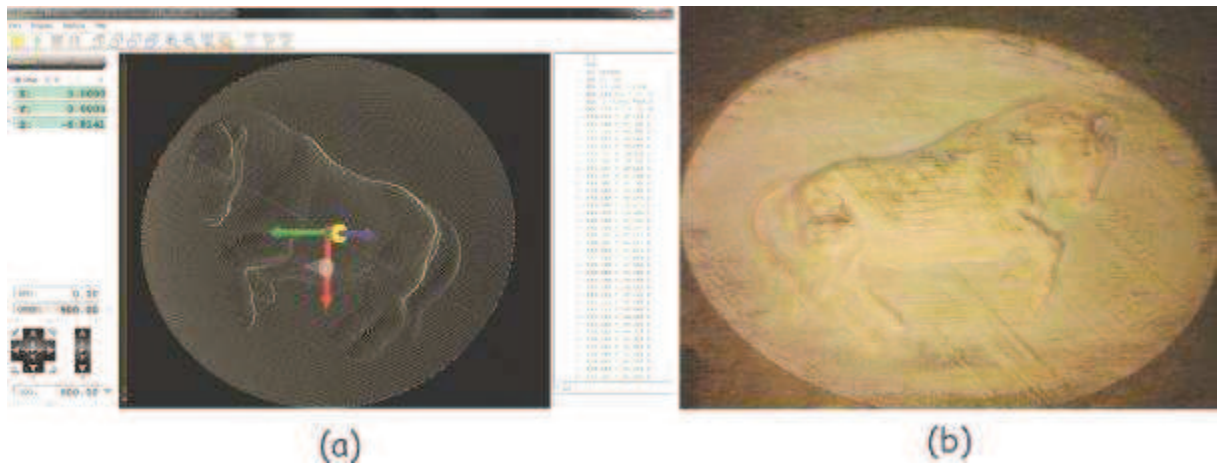


Figura 4.8 Simulación y maquinado al 100%.



Figura 4.9 Mecanizados realizados en tres dimensiones.

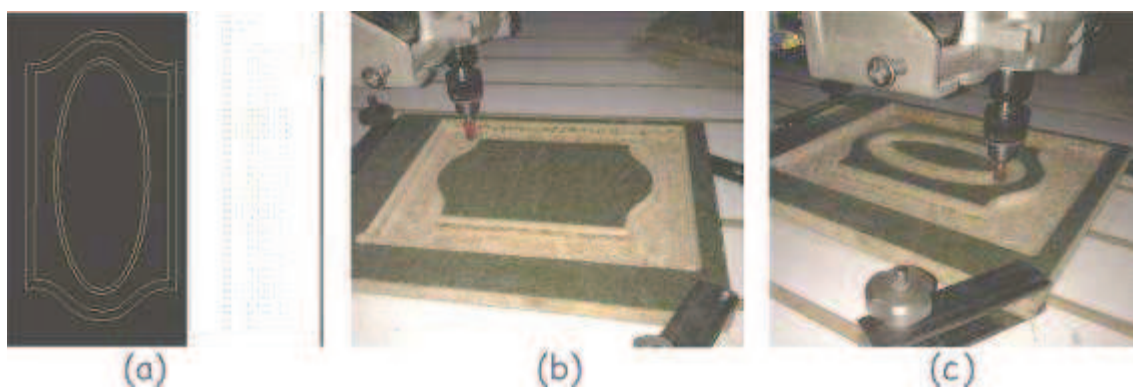


Figura 4.10 Simulación y proceso de maquinado al 100%.

La Figura 4.10 muestra el proceso de maquinado de una moldura para puerta, en este caso se tiene una sola profundidad pero con tres diferentes tipos de fresas para obtener distintos acabados en los contornos.

El proceso de corte y desbaste de madera se ilustra en las Figuras 4.11 y 4.12.

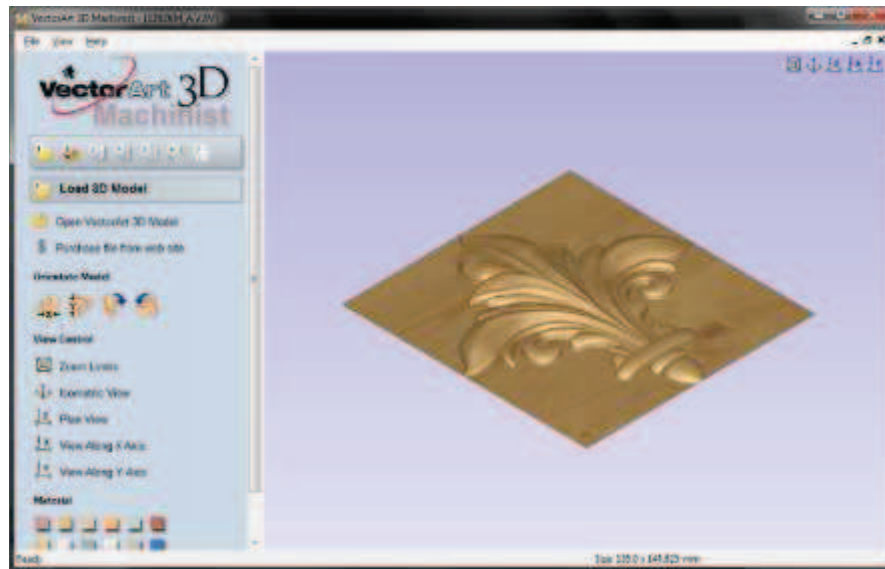


Figura 4.11 Diseño CAD - CAM moldura 3d.



Figura 4.12 Corte y desbaste en 3d sobre madera.

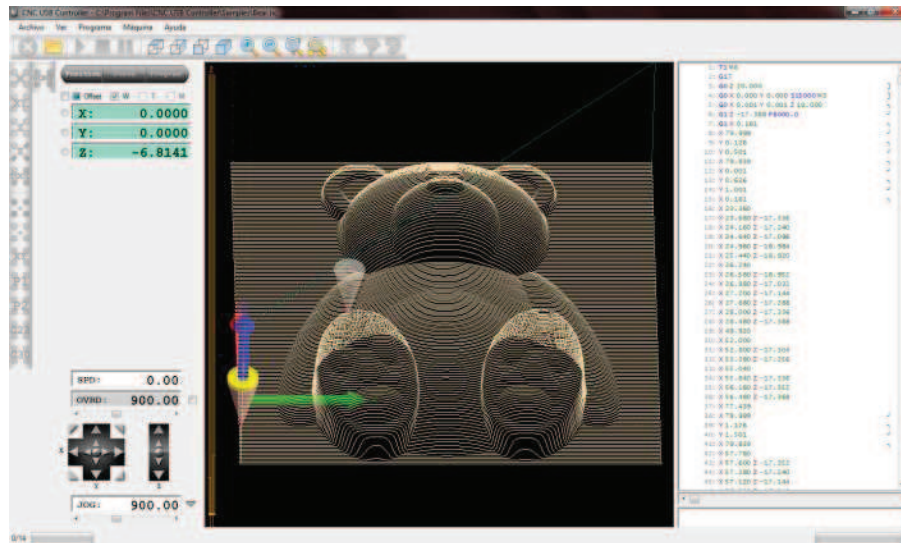


Figura 4.13 Simulación y código G oso 3d.

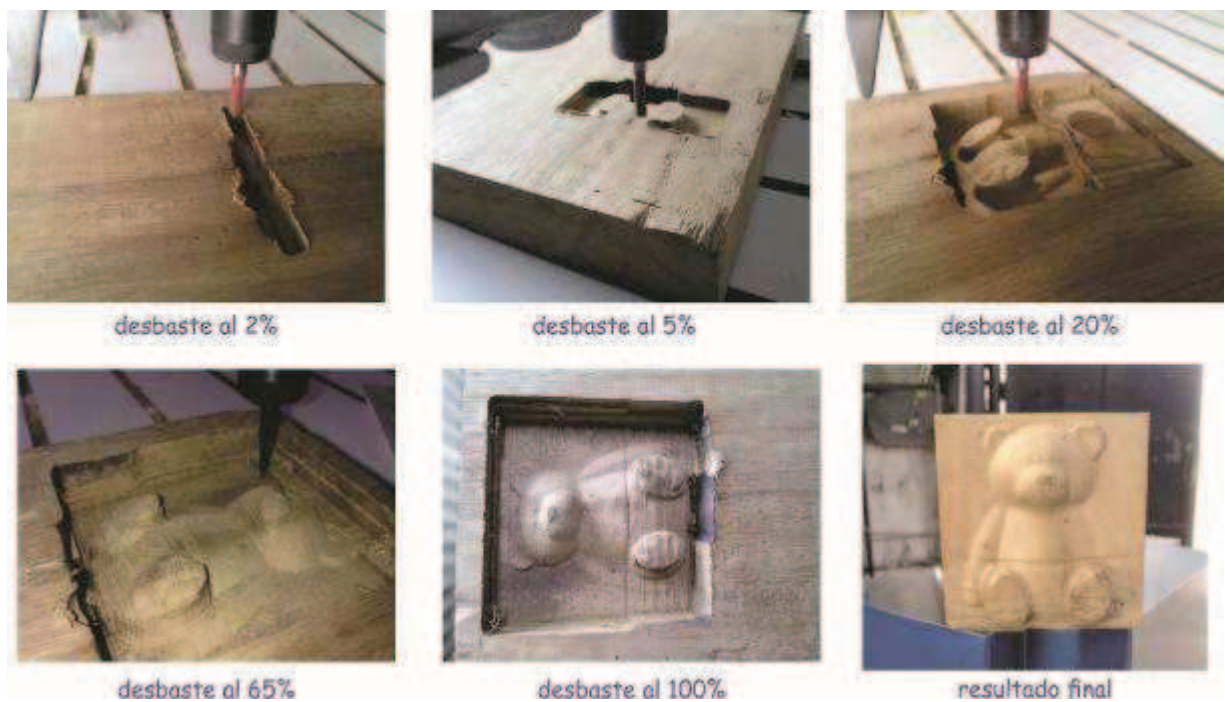


Figura 4.14 Proceso de maquinado Oso 3d.

Para el mecanizado del oso 3D, se realiza con tres diferentes tipos de fresas del 0 a 40 % se usa una de mayor diámetro (5mm), luego del 40 al 70 % una fresa de menor diámetro (3mm), finalmente una fresa de diámetro = 2mm, obteniendo de esta forma un acabado fino y menor tiempo de mecanizado.





Figura 4.15 Diseño y simulación letras 2d.

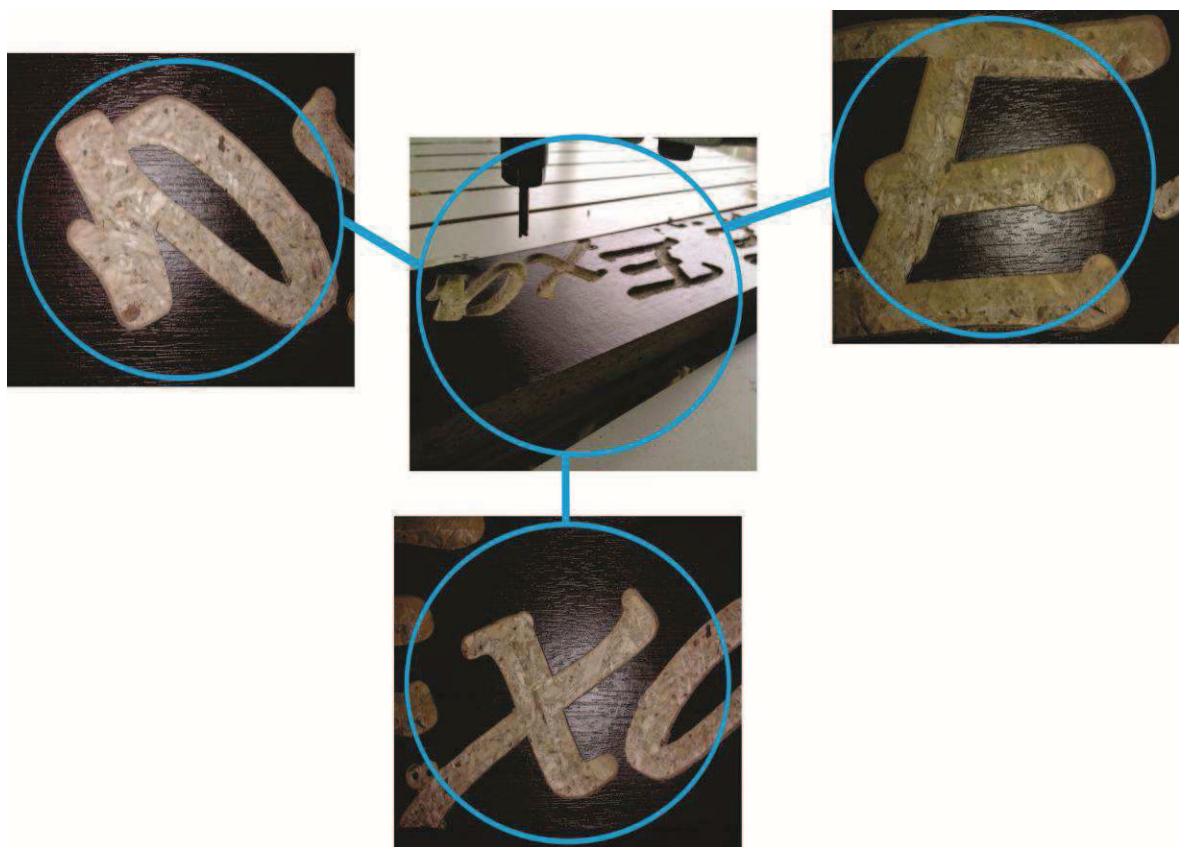


Figura 4.16 Resolución del maquinado.



**Mecanizado del Búho de la Escuela Politécnica Nacional.**

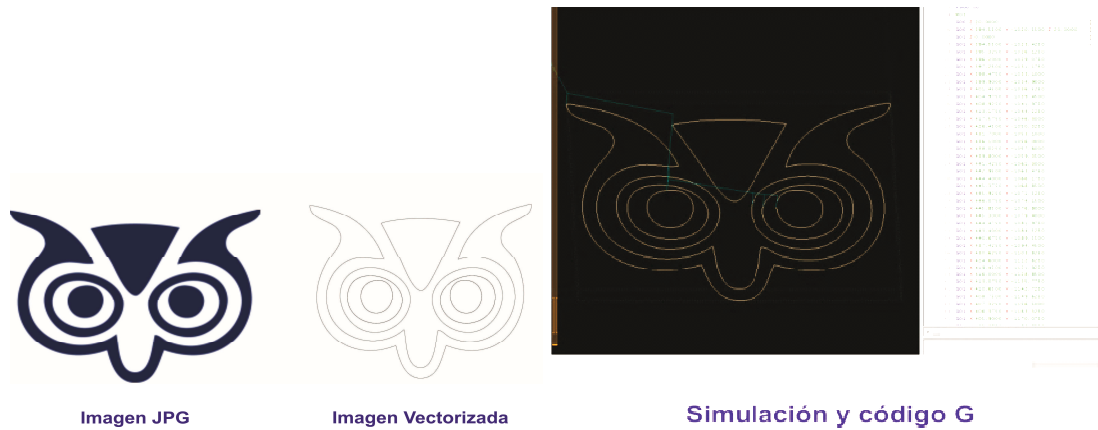


Figura 4.16 Proceso CAD – CAM – Post procesador.



Figura 4.17 Grabado sobre madera búho.

Las siguientes Figuras ilustran el grabado y corte en acrílico transparente de 3mm de espesor, a una velocidad mecanizado de 400 [mm/min].



Figura 4.18 Proceso de corte y grabado sobre acrílico.



Figura 4.19 Mecanizados sobre acrílico.

Finalmente se muestra el proceso de mecanizado para el logo de la Escuela Politécnica Nacional.

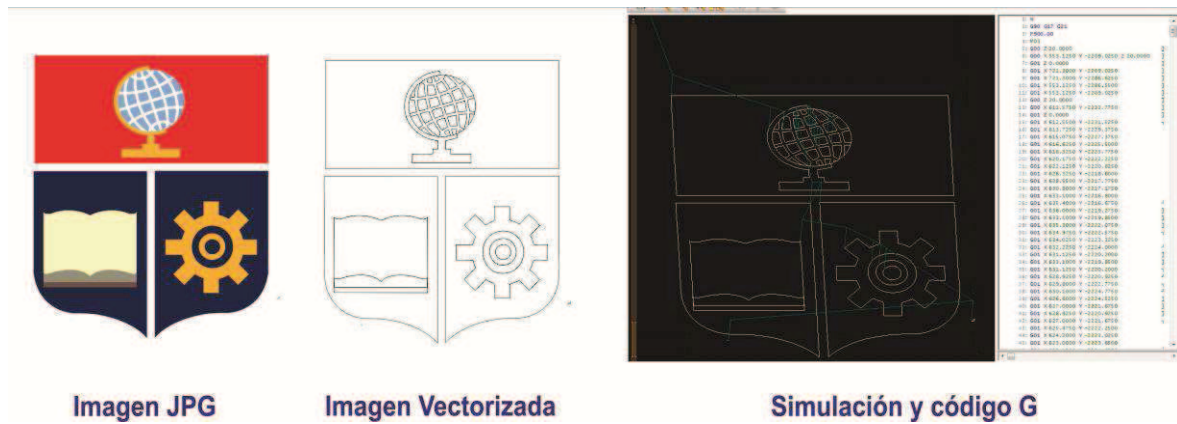


Figura 4.20 Proceso CAD – CAM – Post procesador.



Figura 4.21 Corte y grabado sobre acrílico sello Escuela Politécnica Nacional.

Como se aprecia en las Figuras del presente capítulo el “Centro de Mecanizado CNC” cumple con los objetivos planteados, realizando exitosamente el corte o grabado en dos y tres dimensiones sobre cual tipo de superficie.

### 4.3 CENTRO DE MECANIZADO IMPLEMENTADO





Figura 4.22 Centro de mecanizado , vista frontal.



Figura 4.23 Centro de mecanizado , vista lateral.



Figura 4.24 Centro de mecanizado , vista superior.

Como resultado del presente proyecto de titulación se tiene un centro de mecanizado CNC con tres grados de libertad, que permite realizar en forma automática el corte y grabado con una excelente exactitud y precisión, como se muestra en la sección 4.2. El diseño, construcción y dimensionamiento permite realizar el maquinado uniforme con una buena velocidad de producción.

#### 4.3.1 CARACTERISTICAS

- Tres grados de libertad implementados, con la posibilidad de ampliar hasta 9 ejes de control.
- Sistema de movimiento accionado por motores paso a paso de alto torque, NEMA 34, lo que permite realizar el maquinado de manera uniforme y mayor velocidad.
- Control de los motores pasos a paso por drivers a micropasos con tecnología DSP, con la posibilidad de configurar la resolución.

- Soporta formatos de diseño gráfico e industrial de los principales software comerciales (DXF, PLT/HPGL, JPG, PNG, AI, EPS. etc), por lo que se puede trabajar directamente, dándole mayor aceptación por parte del usuario.
- Conexión USB 2.0, ejecutable sobre Windows XP, Vista, Windows 7 (32 y 64 bits), EMC2.
- Standard RS274/NGC G-code.
- Post procesador incluido en el software de control.
- Sistema de protecciones eléctricas.
- Fuentes conmutada con protecciones de voltaje, corriente, temperatura y filtro de red.
- Sensores Finales de carrera para todos ejes.
- Paro de emergencia.
- Panel de control para mando manual
- Posicionamiento automático.
- Sensor de longitud de herramienta.
- Spindle de 3HP, con velocidad regulable de 9000 rpm a 22000 rpm, con boquillas de ¼" y ½", además con un acople adicional para un mandril, permitiendo usar todo tipo de fresas.
- Sistema de transmisión de movimiento por tornillos de bolas re circulantes y guías lineales, reduciendo los efectos de la vibración y el backlash, garantizando precisión y exactitud.

#### **4.3.2 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA**

- Sistema de alimentación 110 V, con toma polarizada.
- Computador, con procesador de 1GHz, 512 MB RAM, 500MB de espacio en el disco, Puerto 2.0.
- Se recomienda de preferencia tener un UPS para alimentar al computador y al centro de mecanizado.
- Sistema de protección auditiva y ocular para el operador.

### 4.3.3 COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Los costos de implementación del centro de mecanizado se resumen en la Tabla 3.23 y Tabla 3.24.

ELEMENTO	VALOR [USD]	IVA (12%)	SUBTOTAL [USD]
ESTRUCTURA METALICA (Perfiles, tubos estructurales cuadrados, tubo rectangular, planchas de tol galvanizado)	221,96	26,6352	248,5952
ELEMENTOS DE SUJECIÓN (Pernos, arandelas, tuercas, machuelos, brocas)	74,23	8,9076	83,1376
ACOPLES MECANICOS (Bases de motores, love, joy, pinza de sujeción)	270,02	32,4024	302,4224
PINTURA Y PREPARACION DE SUPERFICIE (Pintura sintética, fondo, lija, masilla, diluyentes)	83,27	9,9924	93,2624
TUPI + FRESA Y ACOPLER (Dewalt 625, acople madril, fresas)	481,08	57,7296	538,8096
TABLERO RANURADO (Mesa de trabajo)	72,55	8,706	81,256
GUIAS LINEALES EN ACERO TEMPLADO PERNOS DE BOLAS RE CIRCULANTES ACOPLES DE SUJECIÓN (Para los ejes X, Y, Z)	2859,36	343,1232	3202,4832
SEMICONDUCTORES, CIRCUITOS IMPRESOS, CAPACITORES (4n25, MOC3021, Bta06, capacitores 10pf, baquelitas, borneras)	44,67	5,3604	50,0304

PULSADORES, LUZ PILOTO, BLOQUES DE CONTACTOS (Pulsadores de inicio, detención, paro, avance manual)	54,72	6,5664	61,2864
CONTACTORES, DISYUNTOR, FUSIBLES (Contactor Ls 18A, disyuntor C16, fusibles)	54,1	6,492	60,592
TABLERO ELECTRICO, CANALETA (Armario eléctrico 60x40x30, canaleta ranura de 3x2 cm)	48,49	5,8188	54,3088
CABLE, SEÑALIZACION Y SUJECCIÓN (Cable igus, cable sucre, cable de control, marquillas, abrazaderas, prensa estopas)	133,09	15,9708	149,0608
MOTOR EJE X (Motor a pasos SY85STH156-6204B)	228,23	27,3876	255,6176
MOTOR EJE Y (Motor a pasos SY118STH80-6004B)	212,96	25,5552	238,5152
MOTOR EJE Z (Motor a pasos SY85STH80-5504B)	148,85	17,862	166,712
DRIVER EJE X (Driver Leadshine AM882)	193,74	23,2488	216,9888
DRIVER EJE Y (Driver Kinco 2M880N)	177,2	21,264	198,464
DRIVER EJE Z (Driver Kinco 2M880N)	177,2	21,264	198,464
CADENA PORTA CABLES (Cadena portacables Iigus 250 cm)	147,8	17,736	165,536

FUENTE DE PODER (Fuente SE-600)	332,5	39,9	372,4
CONTROLADORA CNC (Controladora MK2)	448,8	53,856	502,656
<b>TOTAL</b>	<b>6464,82</b>	<b>775,7784</b>	<b>7240,60</b>

Tabla 3.23 Costo de elementos y componentes.

ITEM	SUBTOTAL [USD]
COSTO DE ELEMENTOS Y COMPONENTES	7240.60
INGENIERIA	4400
<b>TOTAL</b>	<b>11.640,6</b>

Tabla 3.24 Costo total del centro de mecanizado.

El costo de Ingeniería esta calculado en base a cuatro meses de trabajo con un sueldo de 1100 USD, el costo total de implementación es de 11.640,60 dólares americanos, el cual es un 45% menor al costo promedio de una maquina CNC de similares características y funciones importada. Por lo que su implementación es económica y técnicamente viable.



## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- Un sistema CNC es el resultado de la integración mecánica - electrónica en una sola herramienta que permite realizar mecanizados de alto grado de dificultad con una excelente precisión y exactitud.
- Un sistema CNC debe ser flexible y de fácil adaptabilidad a los cambios en los procesos de producción, por lo cual su diseño debe estar orientado a ello, el centro de mecanizado implementado tiene la posibilidad del cambio de spindle por otra herramienta como oxi corte o laser permitiendo trabajar sobre otras superficies, el sistema electrónico seleccionado puede controlar hasta de 9 grados de libertad y manejar herramientas auxiliares como refrigerantes, aspirado, nebulizadores entre otros.
- El centro de mecanizado implementado satisface los requerimientos planteados, los tres grados de libertad cumplen los objetivos de grabar, cortar en 2D y 3D sobre acrílico, madera y todo tipo de material rígido (excepto metales), su diseño, construcción y dimensionamiento se orientan a implementar una herramienta capaz de competir con máquinas CNC importadas, objetivo que se ha logrado cumplir satisfactoriamente.
- El sistema mecánico debe ser robusto capaz de soportar el esfuerzo al realizar el mecanizado, reducir al máximo los efectos de la vibración, el sistema de transmisión de movimiento no debe tener juego o backlash.
- La seguridad del proceso y del operador es el primer factor a tomar en cuenta al diseñar una máquina, por lo cual el sistema debe contar con las protecciones que actúen sobre el proceso de mecanizado, sobre el sistema mecánico, sobre el sistema de alimentación eléctrica.
- Las características de la controladora y el software de control seleccionados le dan al usuario pleno control sobre las funciones necesarias para realizar el mecanizado, su programación permite

adaptarse fácilmente a distintas condiciones, es compatible con la mayoría de formatos usados en el diseño 2D y 3D, se cuenta con conexión USB características que le dan una gran ventaja sobre sistemas desarrollados en base al puerto serie o paralelo.

- El sistema de control en lazo abierto usado para los motores paso a paso cumple con los requerimientos, por lo cual no es necesario cerrar el lazo de control, pero el éxito de este, depende directamente del estado mecánico de toda la parte estructural, por lo cual para el correcto funcionamiento del centro de mecanizado CNC se debe dar mantenimiento periódico a todo el sistema de transmisión de movimiento.
- El centro de mecanizado implementado obtuvo resultados que están a la par de una máquina importada a un menor costo, por lo que su desarrollo es viable y económicamente rentable, su fabricación en serie justificaría el desarrollo de todos los componentes en el país, por lo que su costo de producción disminuiría y se generarían fuentes de trabajo.
- La Escuela Politécnica Nacional y la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica mediante su personal docente y programa de estudios permiten a los estudiantes planificar y diseñar proyectos de automatización con excelentes resultados prácticos que gracias al apoyo de la empresa privada se los implementan contribuyendo de esta manera al desarrollo de la industria ecuatoriana.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

- El presente proyecto de titulación cumple con todos los objetivos planteados, sin embargo sería recomendable que su implementación sea el resultado de ingeniería electrónica - mecánica, combinadas como una sola. Por lo cual se recomienda una materia optativa que pueda al menos orientar y motivar al estudiante al diseño, implementación y automatización de herramientas desde el punto de vista mecánico.
- El sistema de transmisión de movimiento debe ser diseñado e implementado tomando en cuenta la fuerza necesaria para el mecanizado

y la longitud del recorrido, evitando de esta manera problemas de vibración o flexión de los ejes.

- Cuando se va a realizar el mecanizado es importante que el material este completamente paralelo al plano XY conformado por el spindle de manera que se obtenga una profundidad uniforme en el grabado.
- La máquina debe trabajar sobre una superficie: a nivel, rígida y ventilada considerando que existe desprendimiento de viruta, el área de trabajo debe ser segura, contar con ventilación y un sistema contra incendio.
- Para realizar el mecanizado sobre distintos tipos de materiales se debe calibrar la velocidad de avance y del spindle, elegir la fresa correcta permite obtener acabados más finos a una mayor velocidad de producción.
- El sistema debe estar diseñado para trabajar en un ambiente industrial, debe tener protecciones contra EMI, el cable de comunicaciones USB debe ser blindado, se recomienda que la alimentación eléctrica se la realice por medio de un sistema de alimentación ininterrumpida “UPS”, asegurando la estabilidad y confiabilidad para concluir con éxito una tarea asignada.
- El dimensionamiento de los componentes del centro de mecanizado debe estar orientado a la posibilidad de ampliación de las características y servicios a fin de construir un sistema poli funcional.
- Se debe considerar el mantenimiento del sistema, programarlos periódicamente y tener un stock de repuestos.
- Al operar el centro de mecanizado se debe de seguir las normas de seguridad previstas en el manual de usuario, usar protecciones auditivas y oculares, tener precaución con las partes móviles.
- Se recomienda a Gamma Servicios Electrónicos llevar al proyecto a su próximo estado, el cual consiste fabricar CNC laser, con lo cual se consigue mayor resolución por ende mejores acabados en el maquinado además que al no tener superficies en contacto el sistema puede trabajar a mayor velocidad, aumentando la capacidad de producción.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. JIMENEZ, "Manufactura Integrada por Computadora (CIM)", Ingeniería de Manufactura, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 2013.
- [2] L. MIKELL, P. GROOVER, "Materiales, Procesos Y Sistemas", Fundamentos de Manufactura Moderna, México, Pearson Educación, 1997.
- [3] Transformación del entorno, «Procesos de Manufactura,» 2009. [En línea]. Disponible en: <http://trasformaciondelentorno.blogspot.com/>, [Último acceso: 10 05 2012].
- [4] F. NESSIER, "Introducción a la programación y operación de maquinas a cnc", Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, 2009.
- [5] E. DALPENA, «Taller de manufactura cnc,» 2010. [En línea]. Disponible en: [http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/eladio/TEC\\_TALLERMANUFACTURA/CNC.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/eladio/TEC_TALLERMANUFACTURA/CNC.pdf), [Último acceso: 11 05 2012].
- [6] G. K. BOON, A. MERCADO, "Automatización Flexible en la Industria". Editorial LIMUSA, Noruega.1991.
- [7] F. NESSIER, "Introducción a la programación y operación CNC", Laboratorio de maquinas a cnc, Universidad Técnica Nacional, Argentina, 2009.
- [8] DOCENTES CEDIT, "Curso de cnc torno", Centro educativos de difusión e innovación tecnológica, Colombia, 2010.
- [9] J. SABATER, "Fabricación asistida por computador", Ingeniería en sistemas y automática, España, 2003.
- [10] Dipac manta, «Catalogo de electrodos y sueldas,» 2011. [En línea]. Disponible en: [http://www.dipacmanta.com/images/pdf/descargas/suelda\\_conarco.pdf](http://www.dipacmanta.com/images/pdf/descargas/suelda_conarco.pdf), [Último acceso: 11 03 2012].
- [11] J. FLOYD, P. HOOD, "Build Your Own CNC Machine", Apress, New York, 2009.
- [12] Ball Screw Specs, «Ball Screw Critical Speed Specs for Tolomatic's BCS20 Screw Drive Actuator,» 2009. [En línea]. Disponible en: [http://www.tolomatic.com/products/sub\\_page\\_detail.cfm?page\\_id=82&sub\\_page\\_no=260](http://www.tolomatic.com/products/sub_page_detail.cfm?page_id=82&sub_page_no=260), [Último acceso: 17 05 2012].

- [13] N. LARBURU, “Máquinas Prontuario, Técnicas – Máquinas – Herramientas”, Décimo Tercera Edición, Thomson editores, España, 2001.
- [14] Enciclopedia Cubana en la red, Ecuared, «Que es el Acrílico,» [En línea]. Disponible en: <http://www.ecured.cu/index.php/Acrilico>, [Último acceso: 17 08 2012].
- [15] DEWALT, “catalogo dwall 625”, tecnología del corte de la madera, México, 2010.
- [16] F. AGUDELO, “Especificaciones Técnicas”, CNCRepowering, Medellín Colombia, 2012.
- [17] R. MOTT, “Diseño de elementos de máquinas”. Cuarta edición, Pearson educación, México, 2006.
- [18] Vitutor.Net, «Formulas trigonometría básica,» [En línea]. Disponible en: [http://www.vitutor.net/formulas/formulas\\_trigonometria.html](http://www.vitutor.net/formulas/formulas_trigonometria.html), [Último acceso: 27 08 2012].
- [19] NIASA, “Husillo a Bolas”, Catalogo de aplicación y características, México 2008.
- [20] I. ESCALONA, «Introducción al Control Numérico,» Ingeniería Industrial, UPIICSA – IPN, 2004. [En línea]. Disponible en: <http://www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/ger1/macives.htm>, [Último acceso: 27 04 2012].
- [21] R. MEJÍA, “Tecnología Aplicada a Los Procesos de Manufactura”, Universidad Autónoma de México, Editorial FCA, México, 2000.
- [22] J. LASHERAS, “Tecnología mecánica y metrotecnica”. Donostiarra S.A, España.1996.
- [23] Planet CNC, «User manual,» CNC USB Controller, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.planet-cnc.com/index.php?page=home>. [Último acceso: 27 02 2013].
- [24] Corel, «Corel Draw,» Canadá, 2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.corel.com/corel/?storeKey=mx>, [Último acceso: 27 11 2012].
- [25] El galeón.com, «Tutoriales Corel Draw,» hispavista S. L. [En línea]. Disponible en: <http://galeon.com/tutorialescorel/principal.htm>, [Último acceso: 27 11 2012].

- [26] C. BOTTERI ET AL, « Motores Paso a Paso,» Instrumentación y comunicaciones industriales, Universidad Nacional de la Plata, Argentina, 2005, [En línea]. Disponible en: [http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Motores\\_Paso\\_a\\_Paso.pdf](http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Motores_Paso_a_Paso.pdf), [Último acceso: 07 12 2012].
- [27] Zapp Automation, « Motores Paso a Paso,» Bournemouth, Inglaterra, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.zappautomation.co.uk/es/nema-34-motores-paso-a-paso/383-sy85sth118-6004b-nema-34-motor-paso-a-paso.html> [Último acceso: 07 11 2012].
- [28] R. LIADMAN, «Stepper Motors and Control,» Part IV Microstepping of Stepper Motors, 2001. [En línea]. Disponible en: <http://www.stepperworld.com/Tutorials/pgMicrostepping.htm>, [Último acceso: 14 10 2012].
- [29] Kinco, «N Series Stepper Motor Driver 2M880N User Manual,» Nanshan District, Shenzhen, China, 2008. [En línea]. Disponible en: <http://www.kinco.cn/detail.aspx?cid=1055>, [Último acceso: 02 09 2012].
- [30] Leadshine Technology Co.,Ltd, «User Manual AM882,» Nanshan District Shenzhen, China, 2010. [En línea]. Disponible en: [http://www.leadshine.com/Product\\_Show.aspx?ID=44](http://www.leadshine.com/Product_Show.aspx?ID=44), [Último acceso: 02 09 2012].
- [31] Abb, «Fuentes de alimentación,» manual de aplicación ABB, Heidelberg, 2006. [En línea]. Disponible en: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/9146478e6e30e650c12574ec002bec1a/\\$file/1txa114004m0701.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/9146478e6e30e650c12574ec002bec1a/$file/1txa114004m0701.pdf), [Último acceso: 02 05 2012].
- [32] G. GARCERÀ, E. FIGUERES y A. ABELLÁN, “Convertidores conmutados”, Circuitos de potencia y control, Universidad Politécnica Valencia, España, 1998.
- [33] Mw Mean Well, «600W Single Output Power Supply SE-60 0 series, » Taiwán, 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.meanwell.com/search/se-600/SE-600-spec.pdf>, [Último acceso: 12 05 2012].

- [34] Datasheet catalog, «74ls04,» Fairchild semiconductor, 2005. [En línea]. Disponible en: [http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/70/375318\\_DS.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/70/375318_DS.pdf), [Último acceso: 12 08 2012].
- [35] Datasheet catalog, «2n3904,» fairchildsemiconductor, 2009. [En línea]. Disponible en: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/fairchild/2N3904.pdf>, [Último acceso: 12 08 2012].
- [36] Datasheet catalog, «4n25,» fairchildsemiconductor, 2002. [En línea]. Disponible en: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/fairchild/4N25.pdf>, [Último acceso: 12 08 2012].
- [37] Datasheet catalog, «MOC3021,» Motorola, 2005. [En línea]. Disponible en: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/MOC3021.pdf>, [Último acceso: 12 08 2012].
- [38] K. ROSS, “Basic Circuits - Bypass Capacitors”, Encoder, 2008. [En línea]. Disponible en: <http://www.seattlerobotics.org/encoder/jun97/basics.html>, [Último acceso: 20 08 2012].