



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.

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

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

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA LA ELABORACIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS BASADO EN CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO**

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

**HERRERA ANDA DANIEL ESTEBAN**  
daniel\_aha@hotmail.com

**LIANG YUNG HSIN**  
javier4u@hotmail.com

**DIRECTOR: NELSON SOTOMAYOR, MSc**  
nelson.sotomayor@epn.edu.ec

**Quito, Junio 2012**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Herrera Anda Daniel Esteban y Liang Yung Hsin, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros 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.

---

Herrera Anda Daniel Esteban

---

Liang Yung Hsin

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Herrera Anda Daniel Esteban y Liang Yung Hsin, bajo mi supervisión.

---

Nelson Sotomayor, MSc

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco en primer lugar a mi familia y cada una de las personas que brindaron de una u otra manera desde una simple palabra de apoyo hasta la más desinteresada ayuda, entre estas incluyo a nuestro director de tesis Ing. Nelson Sotomayor MSc., a cada uno de nuestros amigos de “La última y nos vamos”, e ingenieros de nuestra prestigiosa universidad a quienes tuve el placer de conocer y quienes además de compartir sus conocimientos nos enseñaron la parte humana de una educación de calidad, en especial al Ing. Patricio Burbano, Ing. Patricio Chico, Ing. Luis Naranjo, Ing. Yadira Bravo y Dr. Andrés Rosales que con su motivación y amistad permitieron dar este gran paso a una nueva etapa de nuestras vidas.

Y un agradecimiento especial a mi gran amigo y compañero de Tesis Javier, que sin su confianza y entrega no se hubiese podido culminar este proyecto.

Daniel

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi familia, a mis padres quienes han dedicado su vida a la mía, a cada una de esas personas especiales, Isamar y toda su familia, a mi amado tío Rodrigo Anda que en paz descansa y cada uno de mis amigos que he tenido la bendición de conocer. Pues aunque las adversidades sean muchas, contar con su sencilla presencia aunque no sea física, me ha motivado a hacer de mi vida un reto cada vez más grande y a agradecer cada día por ella.

Daniel

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres Facundo y Clarita por la paciencia y esfuerzo en todo los momentos. A mi hermana Yu por ayudarme en mis momentos difíciles. A mi compañero de tesis Daniel por su amistad y los apoyos mutuos para completar el proyecto de titulación. A Maja Niermierko quien me ayudó a superarme personalmente y la considero una amiga más importante en mi vida. A todos mis amigos de la universidad. A mi director de tesis Nelson Sotomayor MSc por su guía constante y a mis profesores de la universidad en especial el doctor Andrés por apoyarnos todo el tiempo.

Yung

# **DEDICATORIA**

Dedico mi tesis a toda mi familia y todos mis amigos de mi alrededor.

Yung



## Contenido

Capítulo 1 .....	1
Estudio de la máquina CNC .....	1
1.1 Teoría del proceso de fresado .....	2
1.2 Generalidades – la fresadora CNC .....	3
1.2.1 Movimientos de la herramienta.....	3
1.2.2 Movimientos cartesianos mesa de trabajo.....	3
1.3 Ventajas y desventajas del control CNC .....	4
1.4 Mecanizado de alta velocidad .....	5
1.5 Criterios para elección y sustitución de la herramienta de mecanizado	6
1.5.1 Materiales para las herramientas.....	6
1.6 Sistema de control.....	8
1.7 Funciones del controlador numérico .....	10
1.8 Clasificación de máquinas de CNC por el tipo de control numérico ....	10
1.9 Exactitud del CNC .....	11
1.9.1 Diámetro efectivo, velocidad de corte y altura de vértice.....	12
1.9.2 Velocidad de la eliminación del material o MMR .....	14
1.10 Aspectos económicos del control numérico .....	15
Capítulo 2.....	16
Diseño e implementación del hardware .....	16
2.1 Motor paso a paso.....	16
2.2 Manejo de motor a pasos bipolares .....	17
2.2.1 Funcionamiento .....	20
2.2.2 Protecciones del integrado L298 .....	21
2.3 Configuración de NI USB-6501 .....	22
2.4 Control manual de CNC .....	27
2.4.1 Configuración del joystick .....	28

2.5	Conexión de relés .....	29
2.5.1	Fuente de control/potencia .....	30
2.6	Protecciones .....	31
2.6.1	Opto-transistores .....	31
2.6.2	Schmitt trigger.....	33
2.7	Final de carrera .....	36
2.8	Fuentes .....	38
2.8.1	Fuente de corriente continua 5V/1.5A .....	38
2.8.2	Fuente de corriente continua 3.2V/4A .....	41
Capítulo 3	.....	47
Desarrollo del software y HMI	.....	47
3.1	Procedimientos utilizados en el software .....	47
3.1.1	Presentación.....	48
3.1.2	Calibración de imagen .....	49
3.1.3	Calibración mecánica .....	54
3.1.4	Contorneado .....	61
3.1.5	Desbastado .....	64
3.1.6	Perforaciones.....	68
3.2	Máquina de estados.....	70
Capítulo 4	.....	73
Pruebas y resultados	.....	73
4.1	Funcionamiento mecánico e instrumentación .....	73
4.1.1	Sensores en el eje x .....	73
4.1.2	Sensores en el eje y .....	75
4.1.3	Sensores en el eje z .....	75
4.1.4	Funcionamiento “Lagartos de contacto” .....	77
4.2	Funcionamiento de software y HMI .....	79

4.2.1	Funcionamiento mando manual desde joystick .....	79
4.2.2	Funcionamiento mando manual desde el HMI .....	82
4.2.3	Procesamiento adecuado de imagen .....	84
4.3	Pruebas de realización completa .....	87
4.3.1	Prueba de respuesta mecánica frente a acción de control .....	87
4.3.2	Selección de herramienta de desbastado (fresas).....	89
4.3.3	Selección de brocas para las perforaciones .....	93
4.3.4	Resultados realización completa .....	93
4.4	Listado de elementos y costos .....	95
Capítulo 5	.....	98
Conclusiones y recomendaciones	.....	98
5.1	Conclusiones.....	98
5.2	Recomendaciones.....	100
Referencias bibliográficas	.....	101

## RESUMEN

En el presente trabajo se diseña y construye un sistema alternativo de elaboración de PCB (Printed Circuit Board) mediante una máquina fresadora por Control Numérico Computarizado (CNC) que sustituye a los métodos artesanales y sistemáticos utilizados por estudiantes universitarios y de educación secundaria, permitiendo realizar circuitos impresos con la precisión y exactitud requeridas, sin uso de ácidos o corrosivos, y efectuando adicionalmente perforaciones para la disposición y posterior soldadura (de manera manual) de elementos electrónicos en la PCB elaborada.

Con este objetivo se ensambla una máquina CNC e implementa la instrumentación adecuada que satisfaga los requerimientos para la elaboración de PCB, y adicionalmente se elabora el software y HMI a través de National Instruments LabVIEW 2009, que genera el código CNC necesario para coordinar los movimientos de fresado y perforado a partir de una imagen importada en formato .jpg o .png de cualquier software de diseño de circuitos impresos bajo una resolución recomendada.

Una vez implementado el sistema CNC, se verifica mediante pruebas la eficiencia y eficacia del sistema para la elaboración de circuitos impresos dentro de las etapas de contorneado, desbastado y perforado, y se comprueba que los productos finales cumplen los requerimientos de tamaño para elementos electrónicos.

Se trata así de un sistema CNC capaz de cumplir casi en su totalidad los requerimientos básicos para la elaboración de PCB, de manera semejante con sistemas avanzados de producción de PCB mediante fresado, que hacen uso de cámaras microscópicas con lentes tele-céntricos, herramientas de carburo y sistemas avanzados de control que les permiten obtener mejores resultados, pero siendo para esto, la relación económica incomparablemente superior.

## PRESENTACIÓN

En el presente trabajo se desarrolla el diseño y construcción de una máquina para la elaboración de circuitos impresos (PCB) basada en control numérico computarizado (CNC).

En el capítulo 1, se presenta una breve explicación de la máquina basada en CNC y sobre el procedimiento de fresado. Se mencionan aplicaciones similares y el tipo de sistema de control utilizado.

En el capítulo 2, se explica el diseño e implementación del hardware, donde se detalla y dimensiona los elementos necesarios para controlar los motores a pasos de cada eje de la máquina y el tipo de instrumentación utilizado.

En el capítulo 3, se realiza el desarrollo del software y HMI para controlar la máquina, a través de la adquisición y procesamiento de imagen que genera el código CNC necesario en la elaboración del circuito impreso.

En el capítulo 4, se presentan las pruebas para verificar el correcto funcionamiento del sistema CNC con distintos diseños de PCB, materiales de placas y herramientas de fresado/perforado.

Finalmente el capítulo 5, se presenta las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

# CAPÍTULO 1

## ESTUDIO DE LA MÁQUINA CNC

“El control numérico o máquina de control numérico (CNC) puede designarse como una máquina que es mandada por órdenes de letras y números”. [1]

En general un CNC gobierna 3 tipos de movimientos: [1]

- Movimientos de cabezal y ejes (carros).
- Los cambios de herramientas y piezas.
- Los valores de avances y revoluciones.

Las máquinas de control numérico son similares a las máquinas convencionales, sin embargo existen diferencias principalmente de tipo constructivas, entre ellas se puede nombrar los movimientos del carro, además de que el operario, por ejemplo, debería ser el encargado del control de velocidad de giro, así como del avance de los carros [1]. Así en las máquinas herramientas con control numérico computarizado, no se puede girar ningún volante a mano, para ello todos los carros van provistos de motores de avances propios. De esta manera, si se combina movimientos de dos ejes a la vez, se logra rectas inclinadas o arcos de circunferencias. Para todo esto el mando numérico CNC emite señales generalmente de tipo numérico que al ser traducidas a señales eléctricas amplificadas producen el accionamiento y movimiento de los motores [1].

Por tanto, cuando se habla de máquinas CNC en general se habla de sistemas en los cuales las instrucciones se dan a una máquina de manera numérica, donde los números identifican instrucciones que permiten realizar movimientos coordinados de manera automatizada y con la mayor precisión posible. En general este tipo de sistemas, independientemente del tipo con el que se trabaje, se han desarrollado de manera paralela con un software de CNC propio de este tipo de maquinaria, el cual identifica las diferentes órdenes de movimiento para cada uno de los ejes (X,Y,Z), permitiendo de esta manera efectuar movimientos coordinados, giros, perforaciones, etc.

El presente proyecto opta por realizar un sistema más amigable con el operario, eliminando y/o sustituyendo la programación CNC, que en general resulta bastante tediosa y complicada, por un algoritmo que automatice los movimientos requeridos, y calcule las trayectorias basándose únicamente en una imagen que identifique el circuito a realizar. Por lo tanto el diseño de un PCB se resumiría en el diseño del PCB en computador en cualquier tipo de software que permita exportar a un formato tipo imagen por ejemplo .jpg [2].

## 1.1 TEORÍA DEL PROCESO DE FRESADO

El maquinado no es un proceso independiente, sino parte de una familia de procesos relacionados con una herramienta específica de corte que genera viruta debido al movimiento relativo entre la herramienta y el material de trabajo. Para ello se hace uso de un movimiento primario que constituye la velocidad, y un movimiento secundario llamado avance. La combinación de estos movimientos con la forma de la herramienta y su penetración en la superficie de trabajo es la que produce el efecto deseado en la misma [2].

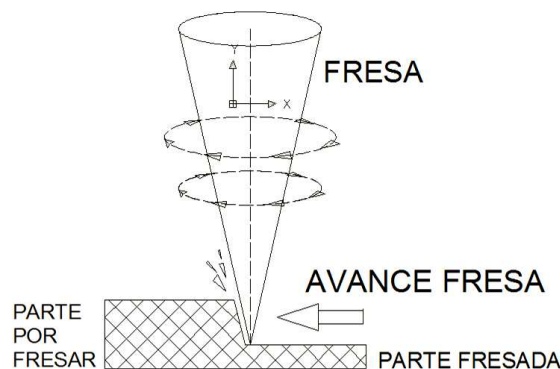


Figura 1.1 Avance de fresa

El fresado es una de las operaciones de maquinado en la cual la herramienta rotatoria con múltiples filos cortantes, dientes, labios, plaquitas de metal, o superficie rugosa, generan un desgaste de la superficie basándose, como se había dicho, en un movimiento primario de giro de la herramienta y en un movimiento secundario de avance perpendicular al eje de rotación [2].

En el taladrado, a diferencia del fresado, la herramienta avanza en dirección paralela a su eje de rotación.

## 1.2 GENERALIDADES – LA FRESADORA CNC

“Una fresadora es una máquina herramienta utilizada para realizar mecanizados por arranque de viruta mediante el movimiento de una herramienta rotativa de varios filos de corte denominada fresa” [2].

Por lo tanto, los movimientos de trabajo de la fresadora se resumen en tres [2]:

1. Movimiento de corte.
2. Movimiento de avance.
3. Movimiento de profundidad de pasada o perforación.

### 1.2.1 MOVIMIENTOS DE LA HERRAMIENTA

En las fresadoras, uno de los movimientos primordiales será el movimiento de la herramienta sobre su eje de giro. En algunas fresadoras inclusive es posible modificar la inclinación de la herramienta y prolongar su posición a lo largo de su eje de giro. Por ejemplo, las fresadoras de puente móvil permiten mantener la pieza fija mientras la herramienta realiza los movimientos necesarios [2].

### 1.2.2 MOVIMIENTOS CARTESIANOS - MESA DE TRABAJO

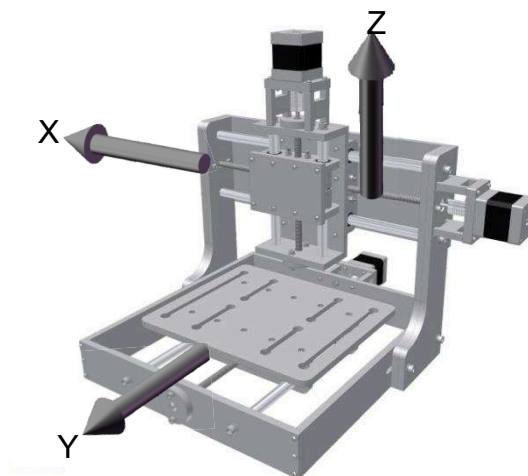


Figura 1.2 Movimientos cartesianos, tomado de [2]



La mesa de trabajo, en general realiza movimientos coordinados tanto de manera automática como manual, con velocidades de mecanizado acorde al material y tipo de trabajo, pero además velocidades de avance rápido en vacío.

Para una máquina CNC con control en circuito abierto vendría a constituir un incremento o variación en la frecuencia con que se envían los pulsos, es decir un control directo en el tiempo de envío de pulsos digitales, por ejemplo aumentar o disminuir milisegundos/pulsos enviados al motor.

Movimiento longitudinal (eje X): Este corresponde habitualmente al movimiento de la herramienta de trabajo. Donde para facilitar la sujeción de la herramienta, la superficie está dotada de ranuras para permitir la fijación de mordazas u otros elementos de sujeción. Esta superficie podría ejecutar movimientos de manera automática de acuerdo a las condiciones de corte que permita el mecanizado [2].

Movimiento transversal (eje Y): Corresponde al desplazamiento transversal, que será ejecutado por la mesa de trabajo, es decir por el desplazamiento de la pieza que estará fijada, y permitirá un movimiento de trabajo inverso al movimiento de la mesa [2].

Movimiento vertical (eje Z): Corresponde al desplazamiento vertical de la herramienta. Con el desplazamiento de este eje se establece la profundidad de devastado del fresado [2].

### **1.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL CONTROL CNC**

Las máquinas CNC presentan ventajas e inconvenientes en comparación con una máquina convencional, entre las ventajas se podrían citar por ejemplo [2]:

- Mecanización de piezas complicadas.
- Precisión e intercambiabilidad.

- Mínima utilización de herramientas adicionales a la máquina.
- Producción en serie de piezas con la mayor precisión, y por tanto aumento de la productividad al no existir fatiga del trabajador.

Mientras que dentro de los inconvenientes que podría presentar una máquina CNC en general, se puede tener lo siguiente [2]:

- Elevada inversión inicial.
- Personal capacitado para su mantenimiento y operación.
- Las fallas suelen ser bastante costosas, por lo cual es indispensable un mantenimiento periódico.

#### **1.4 MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD**

Cuando se considera un mecanizado de alta velocidad, conocido también como HSM se debe tener en cuenta que la limitación viene dada por el tipo de material a mecanizar, el cual debe ser un material HSM.

En general un sistema HSM considera una velocidad de corte segura cuando ésta es de 5 a 10 veces mayor a la velocidad convencional de mecanizado, donde la característica primordial será la disminución de viruta gruesa y además la disminución considerable de temperatura en el filo de corte [4].

Entre algunas de las muchas ventajas que ofrece un mecanizado de alta velocidad están [4]:

- Mejora de la calidad del mecanizado.
- Reducción del tiempo de mecanizado, pues se puede incrementar la velocidad de avance, sin obtener ningún problema de sobrecalentamiento de la herramienta.
- Temperatura de la herramienta baja.
- Mínimo desgaste de la herramienta a alta velocidad.
- Fuerzas de corte bajas (debido a la reducida carga de las virutas)

- Menor potencia requerida, y dureza de la herramienta.
- Poca flexión de la herramienta.
- Reduce las vibraciones, es decir ofrece una estabilidad mayor en el corte.

## **1.5 CRITERIOS PARA LA ELECCIÓN Y SUSTITUCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE MECANIZADO**

Para determinar la vida útil de la herramienta y el tiempo en que se requeriría una sustitución durante las operaciones de maquinado es importante considerar algunos criterios, aunque en algunos casos tengan carácter subjetivo [3]:

- Falla completa (fractura, temperatura excesiva, o desgaste temprano).
- Desgaste del flanco por inspección visual.
- Prueba al tacto del filo cortante, o del desgaste superficial de la fresa.
- Cambios en el sonido emitido por la operación.
- La viruta se vuelve más gruesa, enmarañada y difícil de eliminar.
- Degradación del acabado superficial de la pieza.
- Tiempo acumulado de maquinado (lo cual es posible en máquinas CNC).

Una práctica adecuada en procesos en serie podría ser intercambiar la herramienta después de un número específico de piezas maquinadas.

### **1.5.1 MATERIALES PARA LAS HERRAMIENTAS**

Algunas de las características físicas que se debe tener en cuenta al momento de escoger la herramienta de mecanizado, para proveer un mayor tiempo de vida, son las siguientes:

**Tenacidad:** Esta característica es la que permite evitar fallas principalmente debido a fracturas. La tenacidad es la capacidad que tiene un material de absorber energía sin fallar, pues es una combinación de resistencia y ductibilidad [3].

**Dureza en caliente:** Esta característica le permite al material mantener su dureza cuando opera a niveles altos de temperatura. En el proceso de fresado, debido al efecto físico de fricción, generará gran cantidad de calor, por lo cual es indispensable la determinación adecuada de esta característica o en su defecto, considerar un método de refrigeración para la fresa, que permita mantenerla en una temperatura estable [3].

Los líquidos lubricantes-refrigeradores se usan, principalmente, para la extracción del calor del instrumento cortante. Ellos hacen descender la temperatura en la zona de maquinado, con lo que elevan la resistencia de la herramienta, mejora la calidad de la superficie que se trata y protegen contra la corrosión la herramienta cortante y la pieza bruta que se trabaja. La alimentación de los líquidos lubricantes-refrigerantes a la zona de corte se realiza “regando” dicha zona, con flujo a presión por la parte posterior de la herramienta, por pulverización y/o por otros métodos.

**Resistencia al desgaste:** La propiedad más importante que se requiere para evitar el desgaste es la dureza del material. En general las herramientas para corte son de carácter “duro”, sin embargo la dureza no es la única característica que debe cumplirse para asegurar que no exista un desgaste prematuro. Algunas de las características adicionales que deberían cumplirse son, por ejemplo: el acabado superficial de la herramienta, la composición química de la herramienta, el tipo de material que está maquinando, y uso de fluidos para corte y refrigeración, que podrían aumentar o disminuir su desgaste, dependiendo de su uso [3].

## 1.6 SISTEMA DE CONTROL

Los sistemas de control que usualmente se conocen dentro de las máquinas CNC están implementados con un control en lazo abierto, así como mediante un control en lazo cerrado. Como bien se sabe el sistema de control en lazo abierto es más simple y muchas veces resulta más económico, sin embargo no asegura la exactitud en trabajos en los que el desbaste sea de gran profundidad o para materiales demasiados duros, pues no existe un control adecuado del error que puede ser generado por deficiencia en la fuerza de arrastre, que limitaría su movimiento o generaría un movimiento no uniforme. El mecanismo impulsor que generalmente se utiliza para el movimiento de la mesa u otro miembro de la máquina en este tipo sistema en lazo abierto es el motor paso a paso (stepper motor), que también es conocido como motor digital, pues trabaja por medio de secuencia de pulsos digitales, que excitan de manera sincrónica cada una de sus bobinas dependiendo de la velocidad y torque requeridos. Por ejemplo, si se trabaja con un motor que posee una armadura de 49 polos dentro de un estator de 50 polos, los polos correspondientes deberían siempre estar alineados, por lo cual los polos se deben energizar para alinear los siguientes dos polos y hacen girar por tanto, a la armadura un pequeño ángulo definido [2].

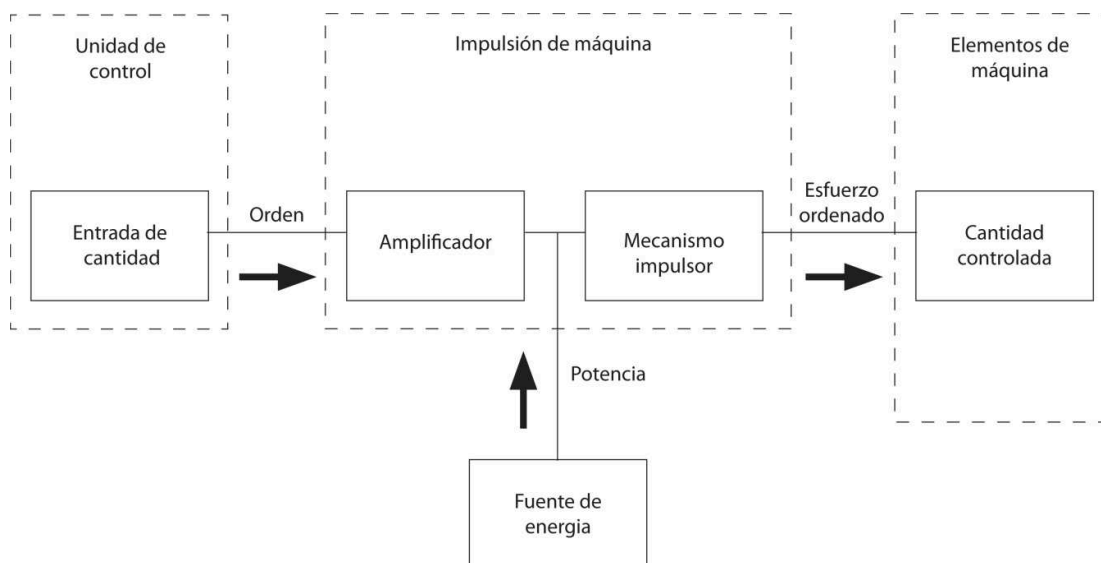


Figura 1.3 Circuito CN Abierto o lazo abierto, tomado de [2]

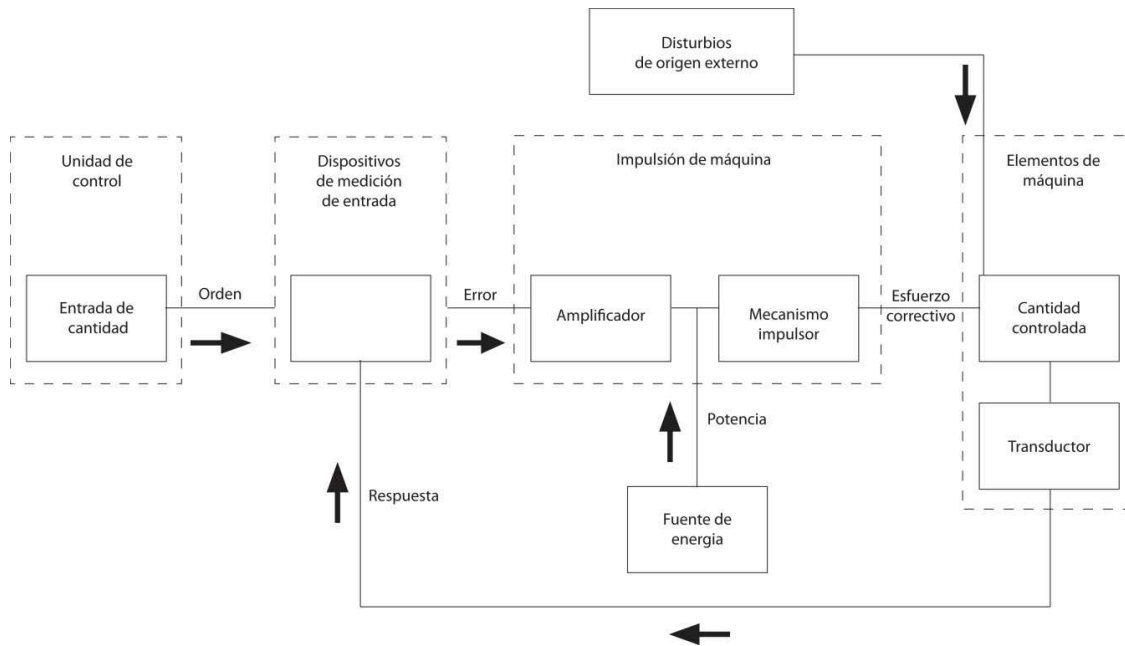


Figura 1.4 Circuito CN cerrado o lazo cerrado, tomado de [2]

Por otro lado, en los sistemas de control de lazo cerrado la señal de impulso para el movimiento de la mesa de la máquina es común que se convierta en una señal estable. Donde, por ejemplo, la velocidad y la alimentación serían controladas conforme el sistema lo requiera, donde la acción se vería reflejada, por ejemplo, en un aumento/disminución de la relación de trabajo de un PWM y posteriormente dicha señal debería ser comparada por la señal de un tacómetro, la cual definirá el tipo de acción que efectuó el controlador.

Esta acción sería recomendable en sistemas en los que el desbastado requiera una fuerza de arrastre bastante considerable, la cual sin duda podría hacer más lento el proceso, o en el peor de los casos hacer que exista un déficit bastante alto en cuanto a precisión o exactitud se refiere.

Sin embargo, para mecanismos de fresado CNC en los que la fuerza de arrastre, no requiera de valores tan elevados, un mecanismo de control en lazo abierto, resultaría suficiente para dar la exactitud requerida, y además ser un mecanismo óptimo desde el punto de vista económico.

## 1.7 FUNCIONES DEL CONTROLADOR NUMÉRICO

El objetivo primordial de un CNC es accionar los componentes de la máquina, con el propósito de realizar un trabajo que requiere alta precisión y, que por ende, resulta bastante complicado realizarlo de manera manual.

La máquina en sí, no puede responder a los números con los que usualmente un programador trabaja, por lo cual: “Los números deberían convertirse a señales temporizadas de magnitudes suficientes para activar los componentes de la máquina” [2].

Por ende, las funciones de un control numérico serían [2]:

1. Leer y verificar cada bloque.
2. Identificar cada instrucción y almacenarla en un registro de manera temporal, mientras el bloque precedente está siendo procesado.
3. Convertir dicha instrucción en una señal, como por ejemplo activar o desactivar, o en el caso de instrucciones de posición, como movimientos para los ejes x, y o z, se convertiría en una serie de pulsos.

## 1.8 CLASIFICACIÓN DE MÁQUINAS DE CNC POR EL TIPO DE CONTROL NUMÉRICO

Las máquinas CNC, en general, se clasifican por el número de ejes de movimiento controlados numéricamente con respecto a las coordenadas cartesianas, sin embargo hay otros movimientos que no son controlados numéricamente. Por lo cual, las máquinas CNC se clasificarán de acuerdo al tipo de control que realicen dentro de tres tipos:

- **Máquinas con control punto a punto o de posicionamiento.** En este tipo de máquina la herramienta se posiciona desde un punto de coordenadas a otro, donde la trayectoria es de poca importancia. Ejemplos de máquinas con este tipo de control son, por ejemplo, el taladro, una soldadora a puntos, etc.

- **Máquinas con control punto a punto con trayectoria recta.** La herramienta realiza movimientos de punto a punto, pero a lo largo de trayectorias rectas o curvas predeterminadas.
- **Máquinas con control de trayectoria continua (control continuo de la trayectoria de la herramienta).** En este tipo de control la herramienta realiza contorneado o perfilado de líneas, curvas o superficies de todas formas. Para esto es necesario realizar movimientos punto a punto rectos o a través de curvas para que la trayectoria compuesta del corte se aproxime a una curva dentro de los límites requeridos [2].

## 1.9 EXACTITUD DEL CNC

La resolución típica de los sistemas de control de alta calidad es de  $2.5 \mu\text{m}$ . Donde, en general, este parámetro va a depender casi enteramente del comportamiento mecánico. La exactitud de la mayoría de las máquinas CNC está dentro de los márgenes de  $\pm 5$  a  $25 \mu\text{m}$ . Sin embargo, se sabe que la exactitud final de una operación de maquinado es la que pueden lograr las herramientas [2].

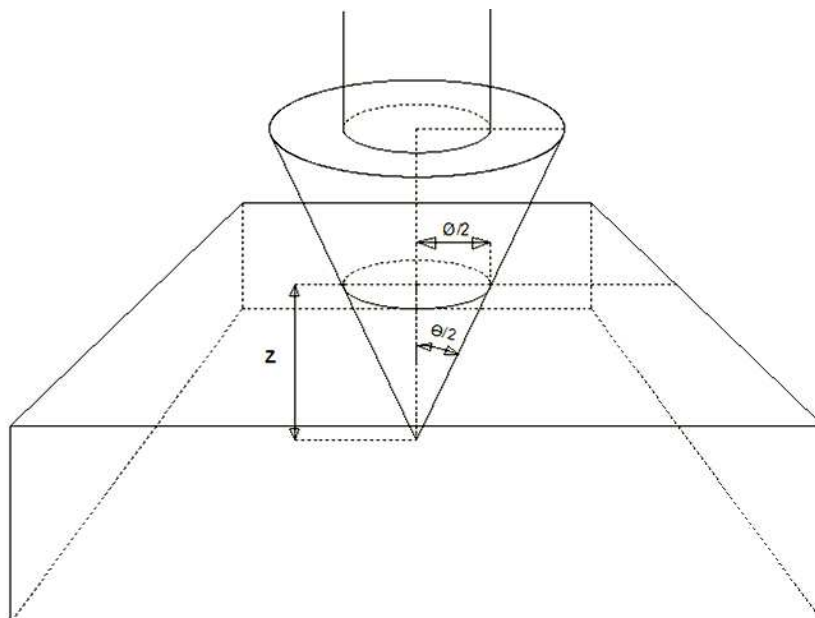


Figura 1.5 Imagen aumentada de penetración en el proceso de devastado

En el proceso maquinado de PCB es indispensable, en primera instancia, determinar una relación entre el ángulo  $\theta$  de inclinación que correspondería al



ángulo de inclinación de la fresa (instrumento de maquinado o desbastado) y además, definir una distancia mínima requerida de precisión  $\emptyset$ , conocida como diámetro efectivo, acorde al trabajo que se va a realizar que garantice a su vez la precisión requerida. Por ende es indispensable calcular aproximadamente la distancia  $z$  de perforación, para posteriormente traducir dicho valor a instrucciones de máquina.

$$\tan \frac{\emptyset}{2} = \frac{\emptyset/2}{z} = \frac{\emptyset}{2z} \rightarrow z = \frac{\emptyset}{2 \cdot \cot \frac{\emptyset}{2}} \quad \text{Ec. 1.1}$$

1.1

### 1.9.1 DIÁMETRO EFECTIVO, VELOCIDAD DE CORTE Y ALTURA DE VÉRTICE

Un método para realizar de manera más precisa el cálculo de la altura de perforación  $z$  de maquinado es considerar el radio de la punta en que termina la fresa, para ello se considera que la forma característica de las fresas radiales, también conocidas como fresas de punta redondeada, las cuales tienen una semiesfera en el extremo de la herramienta. Las fresas radiales son usadas en el mecanizado de moldes, matrices y piezas de trabajo muy complejas [4].

“El diámetro efectivo es el factor principal usado en el cálculo de la velocidad de rotación requerida. El diámetro efectivo es definido como el diámetro real de la fresa. El diámetro efectivo está influido por dos parámetros: el radio de la herramienta, y la profundidad de corte axial” [4].

$$D_e = 2 * \sqrt{R^2 - (A_p)^2} \quad \text{Ec. 1.2}$$

Donde:

$D_e$  = Diámetro efectivo

$R$  = Radio de la herramienta

$A_p$  = Profundidad de corte axial

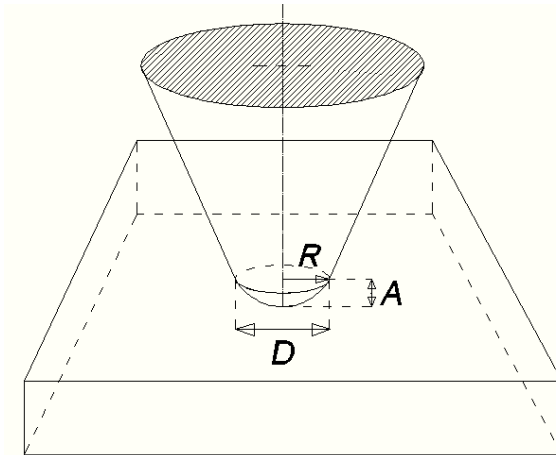


Figura 1.6 Diámetro efectivo y profundidad de corte axial

La velocidad de corte efectivo  $V_c$  para una fresa radial viene dada por la expresión:

$$V_c = \frac{D_e \cdot n}{1000} \quad \text{Ec. 1.3}$$

Donde:

$V_c$  = Velocidad de corte (m/min)

$D_e$  = Diámetro efectivo (mm)

$n$  = Velocidad de rotación (rpm)

En el proceso de desbastado, donde se realiza un movimiento de zigzag, existe una tira que no se corta entre las dos pasadas de corte, la altura de estas tiras no cortadas es llamada altura de vértice [4].

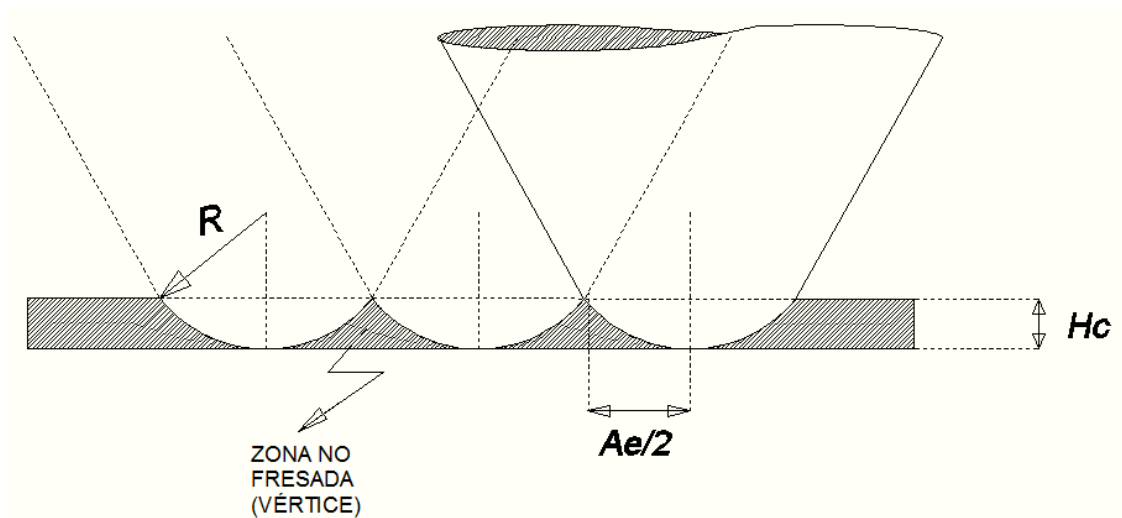


Figura 1.7 Proceso de desbastado

Donde la altura  $H_c$  es conocida como altura de vértice y puede ser calculada de la siguiente manera:

$$= \sqrt{R^2 - \left(\frac{A_e}{2}\right)^2} \quad \text{Ec. 1.4}$$

$$= 2 \cdot \sqrt{R^2 - \left(\frac{A_e}{2}\right)^2} \quad \text{Ec. 1.5}$$

Donde:

$H_c$  = Altura de vértice

$R$  = Radio de la herramienta

$A_e$  = Valor del paso entre dos pasadas de corte

### 1.9.2 VELOCIDAD DE LA ELIMINACIÓN DEL MATERIAL O MMR

Para calcular la velocidad de eliminación de material  $Q$ , así como el volumen de material eliminado en función del tiempo, es decir el volumen inicial de la pieza menos el volumen final, es necesario utilizar las siguientes expresiones:

$$Q = \frac{V_i - V_f}{1000} \quad \text{Ec. 1.6}$$

Donde:

$Q$  = MMR ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )

$a_e$  = profundidad radial (mm)

$a_p$  = profundidad axial (mm)

$v_f$  = valor de avance (mm/min)

El tiempo de corte no es mas que el tiempo necesario para que la herramienta recorra toda la longitud a mecanizar de la pieza. Este parámetro tendrá gran influencia en el acabado superficial final de la pieza [4].

## 1.10 ASPECTOS ECONÓMICOS DEL CONTROL NUMÉRICO

Una de las principales desventajas que se desprende del control numérico, es su alto costo inicial. Este tipo de máquinas cuestan hasta 5 veces más que una máquina ordinaria de tamaño similar, dependiendo de sus herramientas y su capacidad de control. Además de que se requiere personal especializado para su mantenimiento y programación.

Por lo cual, no sería recomendable utilizar el control numérico para todos los trabajos, muchas veces si el trabajo se resume en la elaboración de un número pequeño de piezas y que no requieren un trabajo de alta precisión, se puede utilizar un mecanismo hábil en menos tiempo y a un costo más bajo por hora en una máquina común [2].

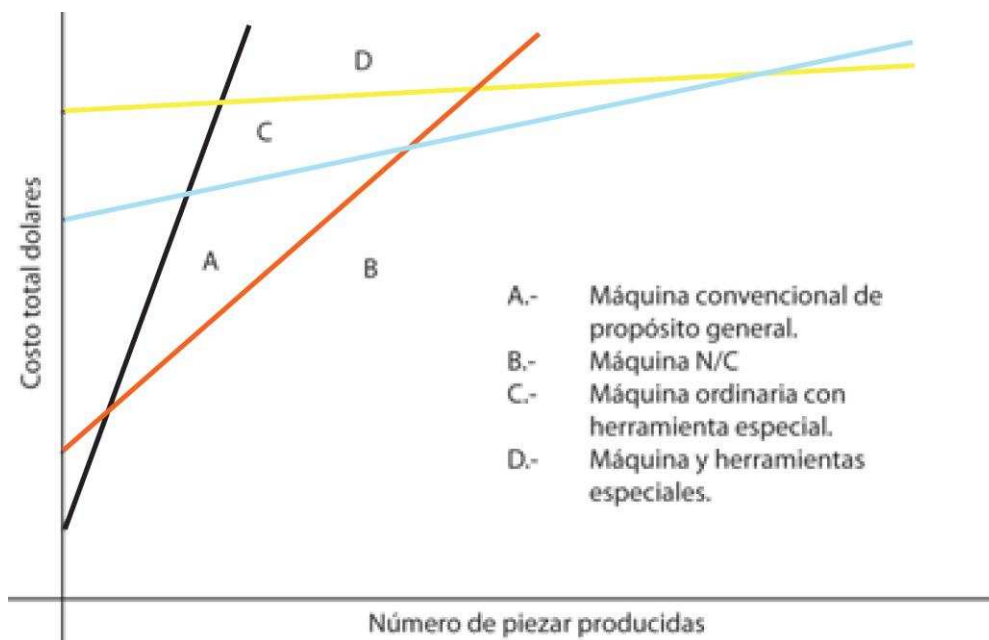


Figura 1.8 Comparación típica del costo del Control Numérico con otros métodos, tomado de [2]

## CAPÍTULO 2

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE

#### 2.1 MOTOR PASO A PASO

Cuando se habla de sistemas de control CNC lazo abierto, se habla de sistemas que involucran motores paso a paso [9], como son por ejemplo los de imán permanente, que al ser dimensionados con el torque requerido, permiten mover al mecanismo de la mesa o de la herramienta con precisión. Los motores a pasos de imán permanente se clasifican en unipolares y bipolares.

De acuerdo con las características de torque y velocidad de avance, el motor a pasos de imán permanente bipolar (Figura 2.1) satisface las exigencias requeridas.

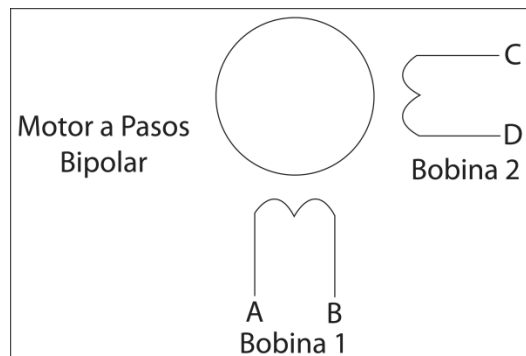


Figura 2.1 Motor a pasos bipolar

Especificaciones técnicas [9]:

Nema:	17
Model #:	42BYGH47-401A (Single Shaft)
Step Angle:	1.8°
Voltage:	2.8VDC
Amperage:	1.68 <sup>a</sup>
Phase Resistance:	1.65Ω(ohms)
Holding Torque:	62 oz/in   4400 gf/cm
Leads (Wires):	4
Inertia:	68 g/cm <sup>2</sup>

## Especificaciones físicas

Longitud:	42.7 mm
Ancho:	42.7 mm
Altura:	35.1 mm
Temperatura mínima de funcionamiento:	-20°C
Temperatura máxima de funcionamiento:	40°C

## 2.2 MANEJO DEL MOTOR A PASOS BIPOLAR

Para efectuar movimientos cartesianos de la mesa de trabajo o de la pieza, se requiere la activación de cada una de las bobinas de los motores paso a paso con una secuencia determinada (Tabla 2.1); dichas activaciones se generan a manera de una instrucción CNC, que mediante el uso de sistemas de acoplamiento y controladores para cada uno de los motores son transmitidas a los mismos y producen los movimientos requeridos.

Tabla 2.1 Secuencia para manejar motor a pasos bipolar, tomado de [8]

PASO	TERMINALES			
	A	B	C	D
1	+V	-V	+V	-V
2	+V	-V	-V	+V
3	-V	+V	-V	+V
4	-V	+V	+V	-V

Esta secuencia de activación del motor a pasos bipolar garantiza el máximo torque del motor, sin embargo esto resultaría en un incremento en el consumo de corriente.

Se puede implementar otro tipo de secuencia con menor complejidad como se muestra en la Tabla 2.2. Esta secuencia garantiza el torque necesario para el avance de la mesa, tanto en vacío como durante el proceso de devastado. Por lo cual se disminuye el consumo, pues al activar únicamente una bobina a la vez, el consumo de corriente se reduciría al 50% aproximadamente.

Tabla 2.2 Secuencia de activación con un puente H, tomado de [8]

PASO	TERMINALES			
	A	B	C	D
1	+V	-V	-V	-V
2	-V	+V	-V	-V
3	-V	-V	+V	-V
4	-V	-V	-V	+V

Para controlar los motores se usa el integrado L298 que es un puente de potencia que sirve para alimentar las bobinas con una corriente máxima de 2A en sus salidas, lo cual, acorde a las especificaciones de los motores, cumple adecuadamente.

Este integrado está formado por 2 puentes H completos (puente completo dual) para alimentar a cada bobina del motor a pasos bipolar. La parte de control del driver utiliza niveles lógicos TTL.

Además posee 2 pines que permiten regular y/o sensor la corriente que circula por las bobinas del motor evitando su sobrecalentamiento, y permitiendo además trabajar con valores más altos de voltaje en la alimentación de potencia. El diagrama interno se muestra en la Figura 2.2 y la distribución de pines en la Figura 2.3.

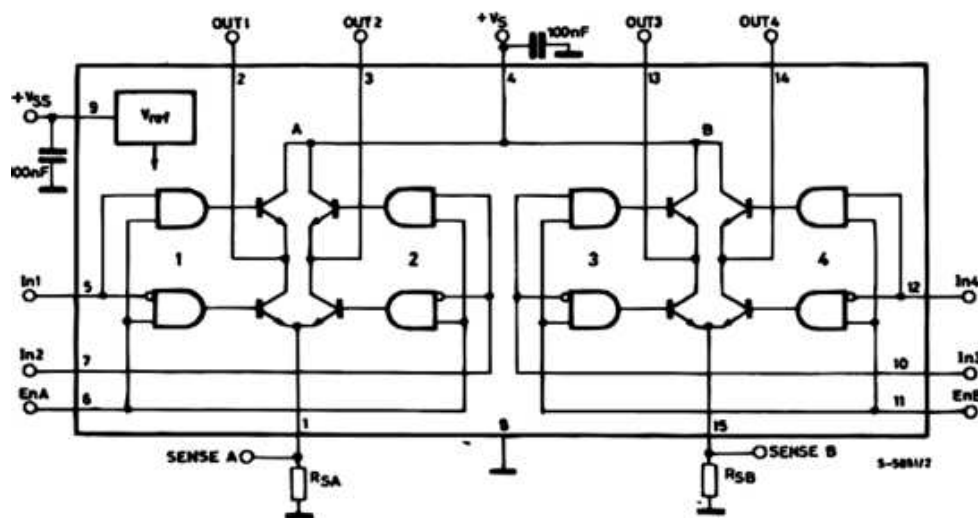


Figura 2.2 Diagrama interno integrado L298, tomado de [11]

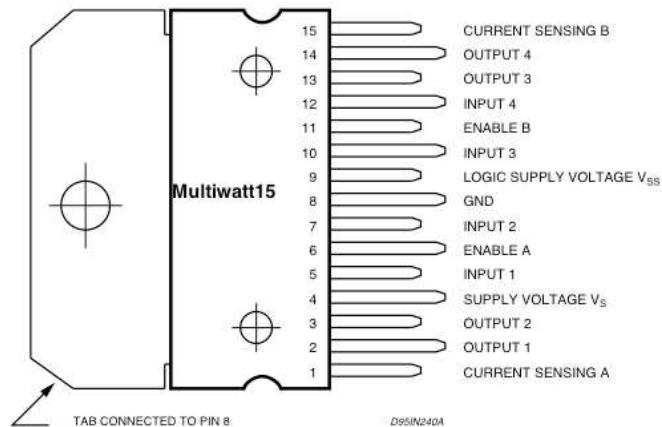


Figura 2.3 Distribuciones de los pines del driver L298, tomado de [11]

Donde:

**V<sub>s</sub> (pin 4):** Voltaje de alimentación del motor a pasos, permite alimentar con el voltaje DC desde 2.5V hasta 46V.

**V<sub>ss</sub> (pin 9):** Voltaje de alimentación para las activaciones lógicas, permite alimentar con el voltaje DC desde 4.5V hasta 7V. Se recomienda activar con voltaje de 5V.

**Pines de entradas (pines 5, 7, 10, 12):** Pines de entradas para las activaciones lógicas. 0L de -0.3 a 1.5V y 1L de 2.3V a V<sub>ss</sub>. Los pines 3 y 4 son entradas para el puente B y los pines 7 y 9 son entradas para el puente A.

**Sensor A y B (pines 1 y 15):** Pines para sensor/calibrar con resistencias la corriente de la carga.

**Enable A y B (pines 6 y 11):** Pines para activación y desactivación de los puentes A y B. Los voltajes de desactivación en 0L están entre -0.3 a 1.5V y los voltajes de activación de 1L están entre 2.3V a V<sub>ss</sub>.

**Pines de salidas (pines 2, 3, 13, 14):** Los pines 2 y 3 corresponden a la salida del puente A y los pines 13 y 14 corresponden a la salida del puente B. La corriente de carga es controlada a través del sensor A y sensor B (pines 1 y 15).

Internamente el circuito integrado L298 tiene 2 puentes H que permiten trabajar en algunas aplicaciones con motores DC (inversión de giro) y motor paso a paso.



### 2.2.1 FUNCIONAMIENTO

Un L298 es un puente completo dual, que acepta niveles lógicos TTL estándar y maneja cargas inductivas como relés, solenoides motores DC y de paso. Tiene dos entradas de activación (enable) para activar o desactivar los dispositivos independientemente de las señales de entrada. Los emisores de los transistores bajos de cada puente están conectados juntos y el correspondiente terminal externo puede ser usado para la conexión de una resistencia externa de medición. Adicionalmente posee una entrada para la fuente de control del integrado, de esta manera la lógica funciona a menor voltaje.

La resistencia sensora, interna y secuencialmente estará conectada en serie a cada bobina del motor paso a paso con el fin de medir la corriente que pasa a través de éstas. El valor de la resistencia de sensado depende del motor a utilizarse, es decir de las corrientes que maneja, tal como se indica:

Se tiene:

$$V_{\text{fuente de potencia}} = V_{\text{activación}} = 3.2V$$

$$I_{\text{bobina}} = 1.68A$$

$$\begin{aligned} &= \frac{3.2}{1.68} \rightarrow \geq 2\Omega \\ &= \quad + \\ 2\Omega &= 1.65\Omega + \\ &\rightarrow \geq 0.35\Omega \end{aligned}$$

Se asume una resistencia de sensado de  $1\Omega$ , lo cual garantiza una corriente de bobina de aproximadamente  $1.20A$ , que es suficiente para generar el movimiento de los motores paso a paso.

## 2.2.2 PROTECCIONES DEL INTEGRADO L298

En cuanto a la temperatura total de disipación del integrado L298 según las especificaciones del fabricante es 75°C con una potencia de salida de 25W. Por lo cual, tomando en consideración esto, se hace necesario el uso de disipadores que permitan eliminar el exceso de calor en el circuito integrado, además de la utilización de diodos rápidos de 2A a la salida del puente para evitar la corriente inversa. En general se recomienda conectar 2 diodos rápidos en cada terminal de salida como protección tal como se indica en la Figura 2.4. Los diodos deben ser de recuperación rápida ya que los motores trabajan con pasos y cada paso equivale a un pulso, mientras más rápida es la secuencia de pulsos que se envían al motor, los tiempos de encendido y apagado, y los retardos debido a los periodos de carga y descarga de las bobinas del motor, podrían limitar su velocidad.

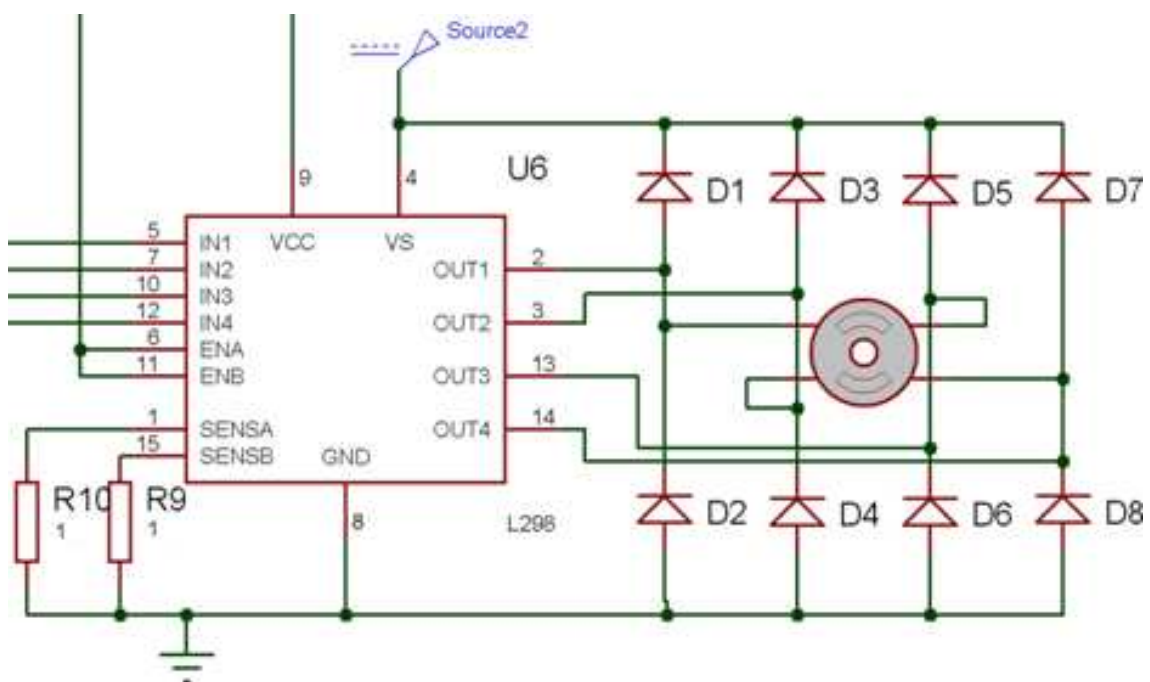


Figura 2.4 Circuito de protecciones del motor con diodos rápidos

La interfaz de comunicación entre la señal que llega al motor y la PC se hace por medio de una tarjeta de adquisición, la cual será la encargada en su primera etapa de enviar cada uno de los pulsos a los motores a pasos, además de recibir todas las señales digitales de sensores y fines de carrera. Se utiliza

la tarjeta de adquisición de datos USB de National Instrument NI USB-6501 (Figura 2.5) que ofrece entradas y salidas digitales para poder controlar los 3 motores a pasos bipolares, es decir 12 salidas digitales (4 por cada motor), además de recibir señales de entradas digitales de sensores e instrumentación (6 fines de carrera, 1 control on/off taladro, 1 señal de nivel).



Figura 2.5 Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6501, tomado de [7]

El NI USB-6501 es un dispositivo de datos de entrada y salida digital portable que se comunica con la computadora a través del puerto USB. Consta de 24 canales bidireccionales digitales con nivel de lógica TTL con la corriente máxima de 65 mA entregando 8.5 mA en cada canal y con un voltaje de entrada y salida máxima de 5 V. Contiene un contador, que puede trabajar a una frecuencia máxima de 5 MHz con el ancho de pulso mínimo de 100 ns con la señal digital de resolución de 32 bits.

### 2.3 CONFIGURACIÓN DEL NI USB-6501

Para la configuración del NI USB-6501 en LabVIEW se hace necesario recurrir Measurement & Automation, en el cual se define las tareas que va a cumplir el dispositivo de comunicación, que en este caso es una tarjeta de adquisición. Al conectar al PC la DAQ, en el Measurement & Automation, se encuentra la pestaña Devices and Interfaces, la cual es la encargada de direccionar a todos

los dispositivos conectados; seleccionando el adecuado, se puede generar todas las tareas necesarias (entradas, salidas digitales) para la aplicación.

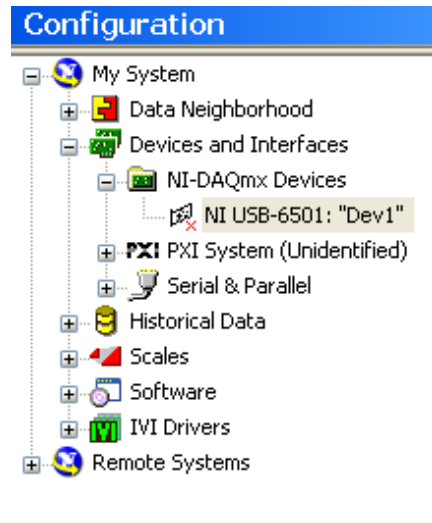


Figura 2.6 Configuración NI USB-6501

Para el NI USB-6501 existe las siguientes entradas y salidas:

GND	1	17	P0.0
+5 V	2	18	P0.1
P1.7	3	19	P0.2
P1.6	4	20	P0.3
P1.5	5	21	P0.4
P1.4	6	22	P0.5
GND	7	23	P0.6
GND	8	24	P0.7
P2.7	9	25	GND
P2.6	10	26	GND
P2.5	11	27	P1.0
P2.4	12	28	P1.1
P2.3	13	29	P1.2
P2.2	14	30	P1.3
P2.1	15	31	+5 V
P2.0	16	32	GND

Figura 2.7 Entradas y salidas del NI USB-6501

Para los movimientos cartesianos de los 3 motores y la adquisición de los estados de los fines de carrera, se tiene la siguiente distribución de pines de la DAQ, y su respectiva asignación a la tarea correspondiente:

Tabla 2.3 Asignación de pines de la tarjeta de adquisición

<b>Dispositivo</b>	<b>Número de entrada(s)/salida(s) digital(es)</b>	<b>Nombre tarea</b>	<b>Pin</b>
Motor X	4 salidas	Motor X	P1.4, P1.5, P1.6, P1.7
Motor Y	4 salidas	Motor Y	P2.4, P2.5, P2.6, P2.7
Motor Z	4 salidas	Motor Z	P2.0, P2.1, P2.2, P2.3
Taladro	1 salida	Taladro	P0.1
Sensor magnético X1	1 entrada	X1	P1.2
Sensor magnético X2	1 entrada	X2	P1.3
Sensor magnético Y1	1 entrada	Y1	P1.0
Sensor magnético Y2	1 entrada	Y2	P1.1
Sensor magnético Z1	1 entrada	Z1	P0.5
Sensor magnético Z2	1 entrada	Z2	P0.7

Cada una de las tareas debería ser adecuadamente configurada en cada PC donde se deba ejecutar el programa.

Para la configuración de los puertos de entrada y salida en el diagrama de bloque en el LabVIEW, existen algunas formas de configuración. Una de las más utilizadas es con la paleta DAQ Assistant de la Figura 2.8.



Figura 2.8 DAQ Assistant

Este bloque permite crear, editar y correr las tareas en el diagrama de bloques. Sin embargo, trabajar en reiteradas ocasiones con DAQ Assistant dentro del mismo VI requiere alto rendimiento de la PC, ya que esta paleta consume excesivos recursos, lo cual sería bastante ineficiente, por este motivo dentro de un programa para CNC es más recomendable optar únicamente por correr las tareas y de esta manera, tener un manejo más adecuado de los tiempos de ejecución, pues estos tiempos influyen directamente en la velocidad de los motores (velocidad de avance).

Para crear tareas en LabVIEW, en el Measurement & Automation, basta con indicar el dispositivo al que corresponde la tarea, además de definir ciertas características propias del tipo de tarea a realizar, dicha tarea quedaría además permanentemente especificada mientras el usuario lo disponga en la PC en NI-DAQmx Tasks (Figura 2.9).

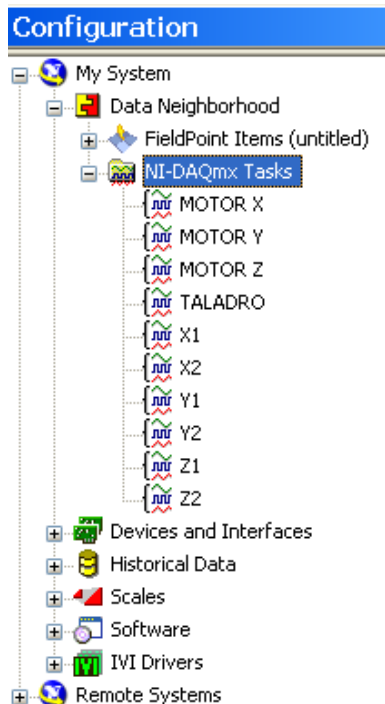


Figura 2.9 NI-DAQmx Tasks

Para poder utilizar las mencionadas tareas en el VI es necesario tener instalado los toolkits adecuados, además de, como se había dicho previamente, tener creada la tarea. Se tiene bloques de lectura y escritura (Figura 2.10 y Figura 2.11), donde bastaría con especificar la tarea en la que se está trabajando, y definir adecuadamente el tipo de datos (entrada/salida) que se manejan.

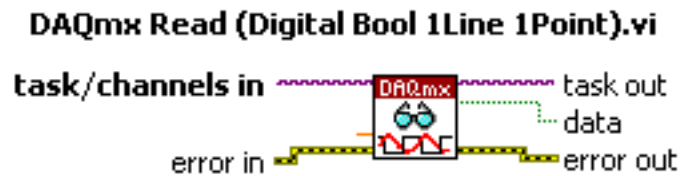


Figura 2.10 DAQmx Read

En la Figura 2.10 se presenta un bloque de lectura cuya tarea vendría estrechamente relacionada con el tipo de operación a realizar, en este caso, la lectura de una o más variables de tipo booleano, numérico u otro, y que a su vez debería ser acorde a las capacidades del dispositivo, es decir si se dispone de una DAQ de entradas digitales, el tipo de datos a leer, correspondería exactamente a datos de tipo booleano, valores simples o tipo arreglo (array), dependiendo si la tarea fue creada para una sola línea o para todo un puerto del dispositivo.

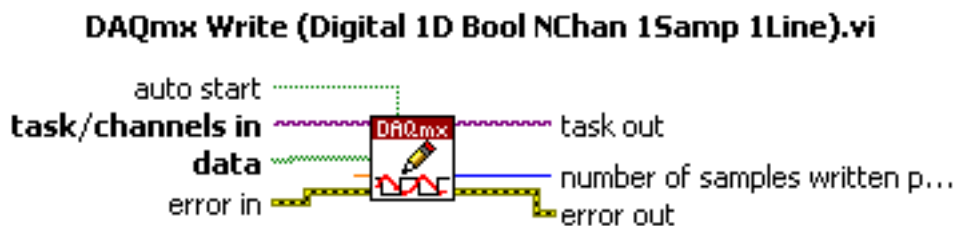


Figura 2.11 DAQmx Write

En la Figura 2.11 se tiene el bloque de escritura para una tarea previamente definida, la cual deberá ser dispuesta en la línea de entrada “task/channels in”, y que, de manera análoga con el bloque de lectura, deberá ser para un tipo, y valor específico acorde con la información que se desea escribir (“data”).

## 2.4 CONTROL MANUAL DE CNC

Una manera adecuada de efectuar un control manual que permita definir posiciones mecánicas iniciales del sistema, además de poder realizar “test” de cada una de las herramientas, es mediante el uso de un joystick. Este brinda además de la disponibilidad de movimiento en tres ejes cartesianos (eje X, Y y Z), la posibilidad de utilizar recursos como son sus botones o gatillos, para el “testeo” de cada una de las partes que tiene una máquina CNC, como por ejemplo el taladro, movimientos continuos de motores, etc. En la Figura 2.12 se encuentra el joystick Genius USB F-23, el cual de acuerdo a sus características brinda un soporte suficiente para esta aplicación.



Figura 2.12 Genius USB F-23

De esta manera el joystick brinda la posibilidad de mover la mesa de trabajo dentro de los ejes X y Y, y adicionalmente, permite maniobrar los movimientos de la herramienta (eje Z) haciendo uso de la pequeña palanca adicional que posee. Para verificar el adecuado funcionamiento de la herramienta de fresado, se utiliza el gatillo que dispone el joystick, a manera de un control on/off. Y de la misma forma brinda la posibilidad de definir un movimiento continuo mediante los cuatro botones que dispone en la parte frontal, que



corresponderían a movimiento continuo adelante, atrás, izquierda y derecha de la mesa de trabajo o de la herramienta según sea el caso.

Uno de los problemas que poseen los joystick es la alta sensibilidad al movimiento que presentan los ejes del joystick X, Y por lo cual es necesario realizar, a nivel de software, un control con histéresis que impida movimientos innecesarios, y ayude a mantener la estabilidad.

### 2.4.1 CONFIGURACIÓN DEL JOYSTICK

El primer paso que se debe seguir para realizar un control manual con joystick es instalar adecuadamente los drivers necesarios, de manera que se pueda reconocer en la PC. Posteriormente es necesario conocer dentro de la PC, y particularmente dentro de LabVIEW, a que número de dispositivo corresponde, para así, identificarlo de manera adecuada dentro del VI. Para posteriormente hacer uso del bloque Initialize joystick (Figura 2.13), que genera una ID o identificación del dispositivo.

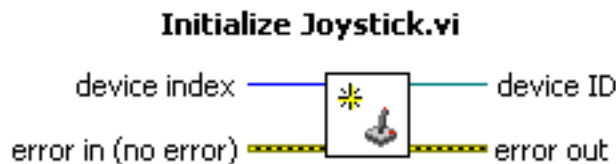


Figura 2.13 Initialize Joystick.vi

Una vez inicializado el dispositivo se puede hacer uso de cada uno de sus recursos, por lo cual el proceso de inicialización del dispositivo se recomienda hacerlo siempre fuera del lazo, para evitar retardos innecesarios, y la inicialización y cierre inadecuado del dispositivo, que podría resultar en posteriores errores.

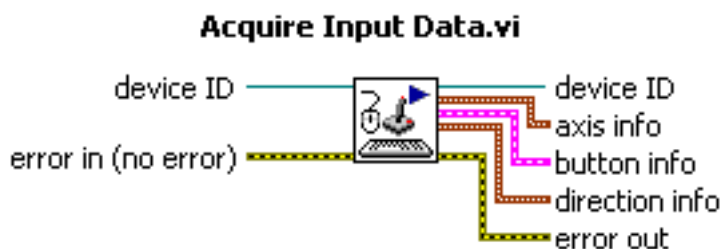


Figura 2.14 Acquire Input Data.vi

Una vez se ha inicializado el dispositivo, mediante el bloque Acquire Input Data (Figura 2.14), se puede leer cada uno de esos recursos según los índices especificados, como son información de ejes, información de botones, información de direcciones, etc.

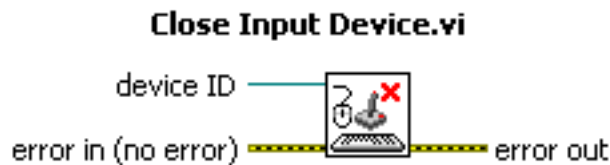


Figura 2.15 Close Input Device.vi

Posteriormente, se hace uso del bloque Close Input Device (Figura 2.15), que permite cerrar el dispositivo especificado en device ID. En general se recomienda colocarlo al final del lazo, cuando este dispositivo ya no sea de utilidad.

## 2.5 CONEXIÓN DE RELES

La utilización de relés es de gran utilidad en controles de tipo ON/OFF, debido a las cualidades en manejo de cargas que poseen. Por ejemplo, en la activación de la herramienta de fresado es de gran utilidad trabajar con este tipo de dispositivo, ya que puede maniobrar esta carga en AC a partir de una señal de control DC, y de la misma forma puede servir como enclavamiento eléctrico para la fuente de potencia, al evitar su funcionamiento a manera de interruptor en caso de una falla o ausencia de la fuente de control.

El procedimiento que se debería realizar para manejar un relé desde la PC, viene dada en las siguientes etapas. La señal enviada desde una instrucción en LabVIEW, viaja a través de la salida digital de la DAQ, para ingresar a un Schmitt Trigger que amplifique la señal de corriente, ya que supera las limitaciones de la DAQ, para posteriormente opto-acoplada, activar al relé a través de un transistor TIP122 (Figura 2.16). Adicional a esto se debe colocar un diodo en anti paralelo, llamado diodo volante, debido a que la desactivación

de un relé provoca una corriente de descarga de la bobina en sentido inverso que pone en peligro el elemento electrónico utilizado para su activación. Un diodo polarizado inversamente cortocircuita dicha corriente y elimina el problema. El inconveniente que presenta es que la descarga de la bobina es más lenta, así que la frecuencia a la que puede ser activado el relé es más baja [10].

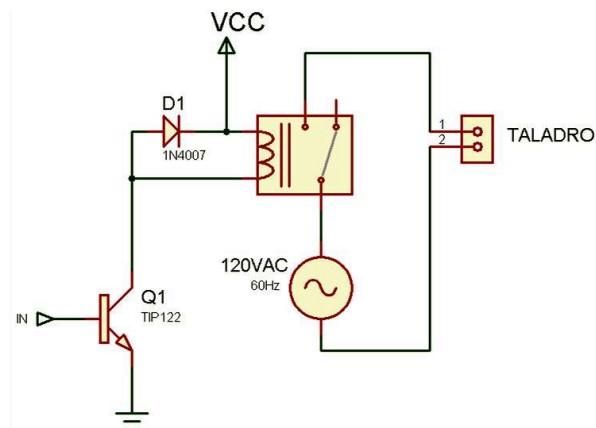


Figura 2.16 Activación de relé para la herramienta de taladrado/fresado

### 2.5.1 FUENTE DE CONTROL/POTENCIA

La activación/desactivación de la fuente de potencia que alimenta a los motores se realiza de dos maneras diferentes, una mediante la conexión/desconexión de un interruptor simple a la alimentación de la red y otra mediante el sistema de enclavamiento, que viene dado en la conmutación de un relé por ausencia o existencia de la fuente de control, el cual permite además, en caso de una falla en el circuito de control disminuir cualquier daño en el circuito de potencia.

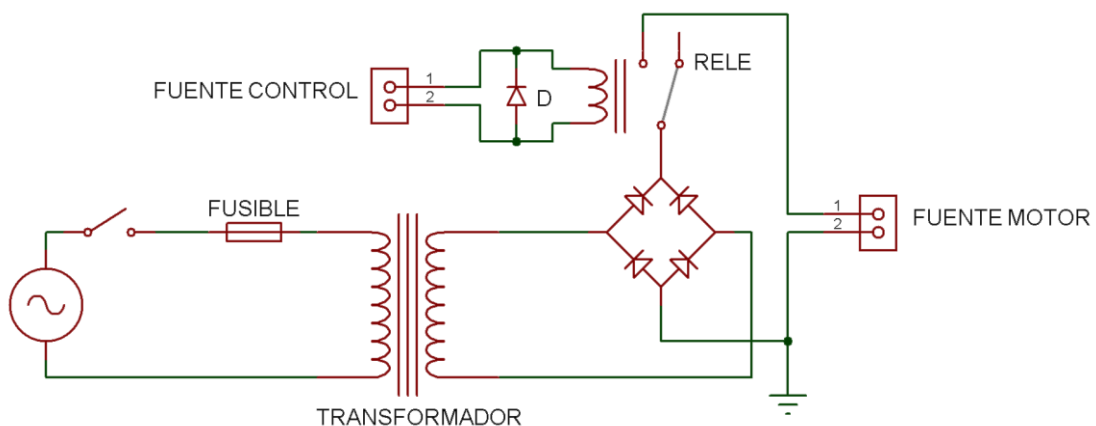


Figura 2.17 Activación/desactivación de la fuente de potencia

## 2.6 PROTECCIONES

### 2.6.1 OPTO-TRANSISTORES

Una de las maneras más comunes que se utiliza para proteger la tarjeta de adquisición del circuito de potencia, es aislar la señal entre la DAQ y los controladores de los motores paso a paso, para ello se hace uso del opto-transistor 4N25 posterior a un Schmitt Trigger que amplifique la señal de corriente, ya que la capacidad de salida de corriente de los terminales de la tarjeta de adquisición dentro de un mismo puerto no es suficiente para la activación de 14 opto-acopladores, como se explica posteriormente.

De esta manera se debe conseguir una corriente de activación del diodo led del opto-acoplador acorde a las necesidades de corriente en el lado de potencia, es así que, partiendo del requerimiento de corriente en el integrado L298, se procede de la siguiente manera:

High Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12) ( $V_i = H$ ):  $100\mu A$

Por tanto se nota claramente que el tipo de señal que requiere el puente L298 en sus señales de control, es definitivamente una señal de voltaje alto ( $V_i = H$ ) o bajo ( $V_i = L$ ) y el consumo de corriente es prácticamente despreciable, por lo que el diseño se centraría ahora en la adecuada activación del diodo, en el lado de control del opto-acoplador, de acuerdo a la configuración mostrada en la Figura 2.18.

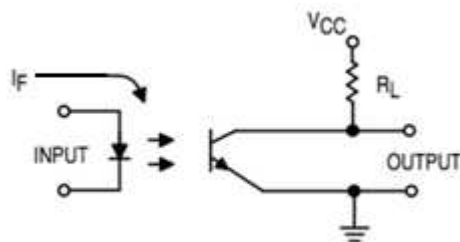


Figura 2.18 Configuración del opto transistor 4N25

Por tanto, partiendo de la relación de transferencia o CTR, se tiene que:

$$\text{DC Current Transfer Ratio CTR} \approx 20 \%$$

$$=$$

Asumiendo el valor de la resistencia de pull-up a un valor de 1kΩ se puede obtener el valor de  $I_C$  con el voltaje de potencia obtenida desde la fuente de potencia cuando el transistor está cerrado.

$$\begin{aligned}
 & - = \frac{V_C}{R_C} \\
 & \text{ó } \rightarrow \approx \frac{V_C}{R_C} \\
 & \approx \frac{3.2}{1 \Omega} \rightarrow \approx 3.2 \\
 & \rightarrow = \times \\
 & = \times \\
 & = \frac{3.2}{0.2} = 16 \\
 & = \frac{5}{16} = 312.5\Omega \\
 & \rightarrow \approx 330\Omega
 \end{aligned}$$

Con el valor de la resistencia pull-up, se requiere calcular la caída aproximada de voltaje y verificar si el valor de voltaje en la entrada corresponde a un valor en alto, cuando el transistor está abierto, es decir:

$$\begin{aligned}
 & \approx \\
 & \approx 100 \quad (1 \Omega) \\
 & \rightarrow = 0.1 \\
 & \rightarrow \approx \quad - \quad = 3.2 - 0.1 = 3.1
 \end{aligned}$$

Por lo tanto, sería un valor adecuado de entrada, ya que según las especificaciones del puente L298, se tiene:

ViH Input High Voltage (pins 5, 7, 10, 12):  $\geq 2.3V$

## 2.6.2 SCHMITT TRIGGER

Debido a que el consumo mínimo para activación de un opto acoplador 4N25 es de 10mA, y cada salida digital de la tarjeta de adquisición entrega máximo 8.5mA, se hace necesario utilizar un circuito adicional entre la tarjeta de adquisición y los opto transistores para poder amplificar la señal y entregar señales adecuadas. Por lo cual se utiliza el circuito integrado 74LS14.

El integrado 74LS14 Schmitt Trigger es un inversor hexadecimal que debido a su efecto de histéresis incrementa la inmunidad del ruido y ayuda a eliminar los efectos de encendido y apagado que vuelven a la señal de entrada, una señal de cambio lento, convirtiéndola en una señal de cambio rápido. Invirtiendo además dicha señal dentro de los niveles TTL. El integrado 74LS14 Schmitt Trigger se conecta entre la tarjeta de adquisición de datos y los opto transistores de la manera que se muestra en la Figura 2.19:

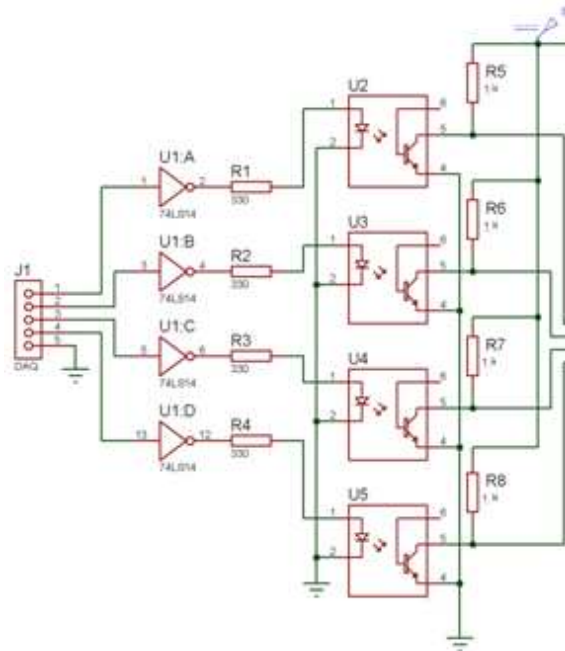


Figura 2.19 Circuito de aislamiento

Donde:

**J1:** Salidas digitales de la tarjeta de adquisición.

**U1 (A, B, C, D):** Integrado 74LS14 Schmitt Trigger.

**R1, R2, R3, R4:** Resistencias de activación opto transistores 4N25.

**U2, U3, U4, U5:** Opto transistores 4N25.

**R5, R6, R7, R8:** Resistencias de PULL-UP para envío de señales lógicas al Driver de motor paso a paso L298.

El diagrama circuital completo para los motores a pasos bipolares se encuentra en la Figura 2.21. En donde la etapa de la DAQ maneja su propia fuente interna, para posteriormente en la siguiente etapa hacer uso de la fuente de control que sería la encargada de alimentar Schmitt Trigger y opto transistores, y finalmente, la etapa de motores y sus respectivos controladores que se alimentan con la fuente de potencia.

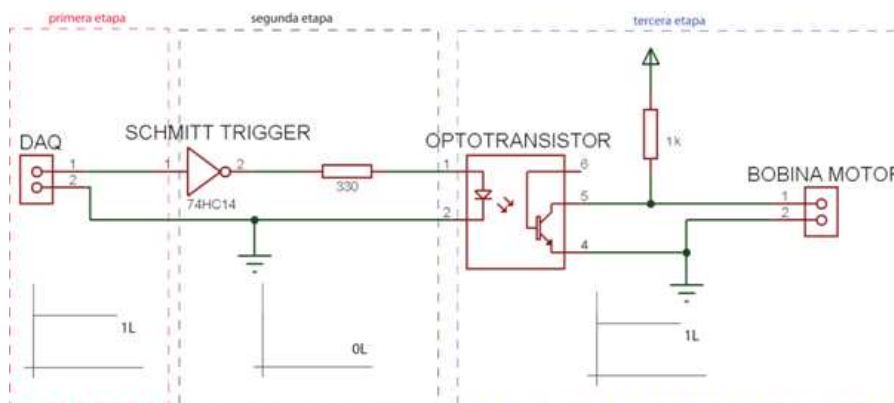


Figura 2.20 Estado lógico en cada etapa

- Primera etapa: En esta etapa, la señal sale desde la DAQ, cuyo valor lógico dependerá de los requerimientos del CN.
- Segunda etapa: A través del Schmitt Trigger la señal es invertida, permitiéndole dar más capacidad de corriente al puerto de la DAQ, de tal modo que sea capaz de suministrar 15mA por canal para la activación del emisor del opto transistor.
- Tercera etapa: En esta etapa acopla el circuito de control con el circuito de potencia, trabajando con fuentes independientes, para lo cual se envía la señal de la segunda etapa a un opto transistor que invierta nuevamente la señal, consiguiendo de esta manera un estado lógico equivalente al de la señal original.

Otra de las ventajas que brinda este tipo de configuración es evitar la activación innecesaria en caso de una desconexión de la DAQ, donde por ejemplo, las salidas del Schmitt Trigger permanecerían en 1L, al no recibir la señal, lo que en efecto al ser invertido nuevamente en el opto transistor resultaría en un estado de 0L, de apagado o desconexión, en las activaciones de las bobinas.

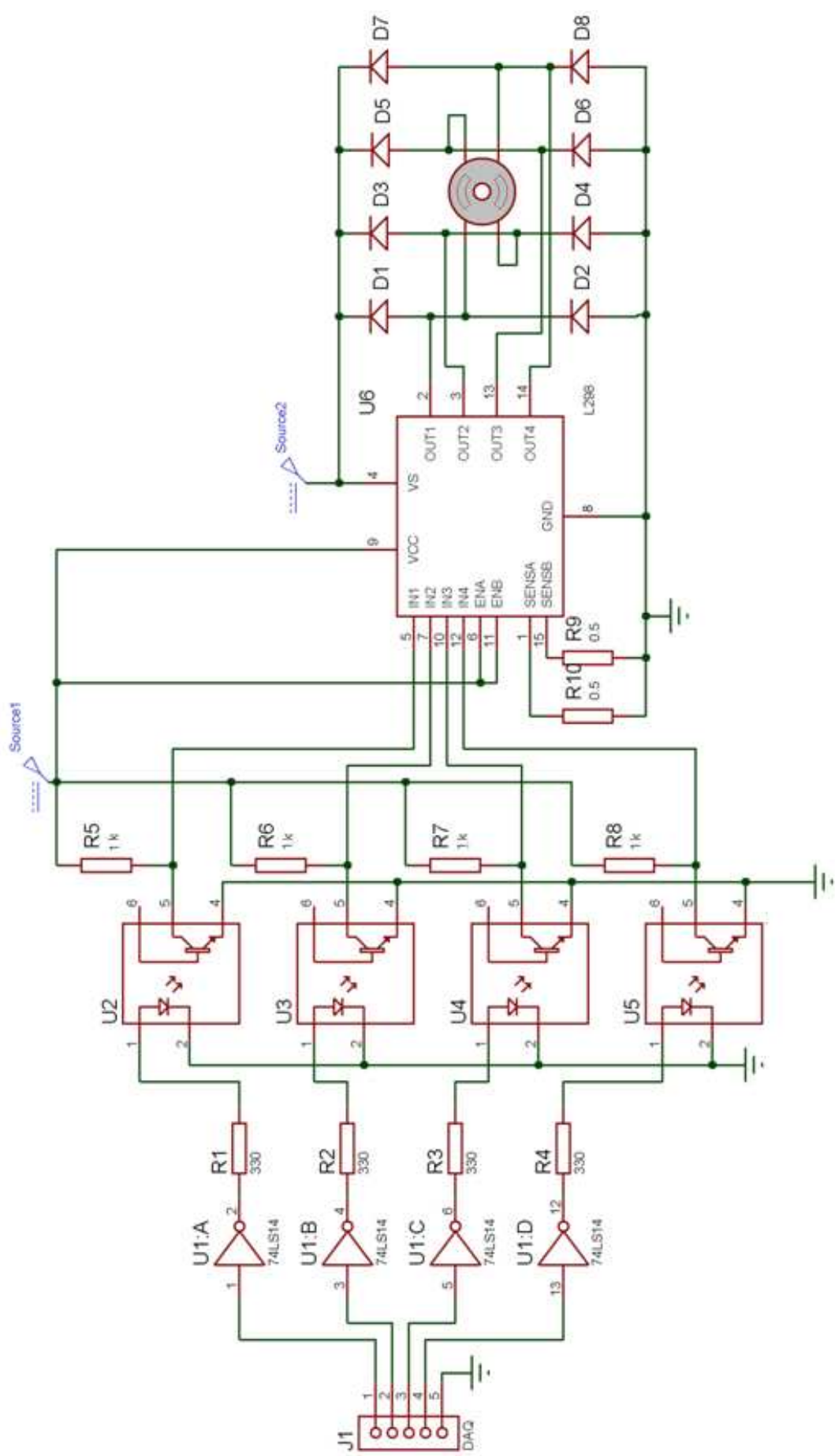


Figura 2.21 Diagrama circuital para manejo del motor a pasos bipolar



## 2.7 FINAL DE CARRERA

Cuando se trabaja con sistemas que presentan movimientos segmentados es indispensable definir los dos puntos de este segmento, para lo cual en la máquina CNC se hace uso de 6 sensores magnéticos (Figura 2.22), dos en cada eje, para evitar en los puntos extremos del sistema mecánico exceda sus limitaciones de movimiento y pueda producir la ruptura o desajuste del eje de movimiento del motor. El sensor magnético consta de un emisor y un receptor, que producen de manera conjunta su activación/desactivación en presencia/ausencia de un campo magnético. El emisor es un imán permanente que genera constantemente un campo magnético, por tanto no dispone de cables de conexión. El receptor es un contacto normalmente abierto, que dispone únicamente dos terminales de conexión, y que en presencia del imán cambia su estado, permitiendo de esta forma, tener un control adecuado de proximidad de la mesa o de la herramienta respecto a su limitación de movimiento longitudinal o transversal, es decir su fin de carrera.

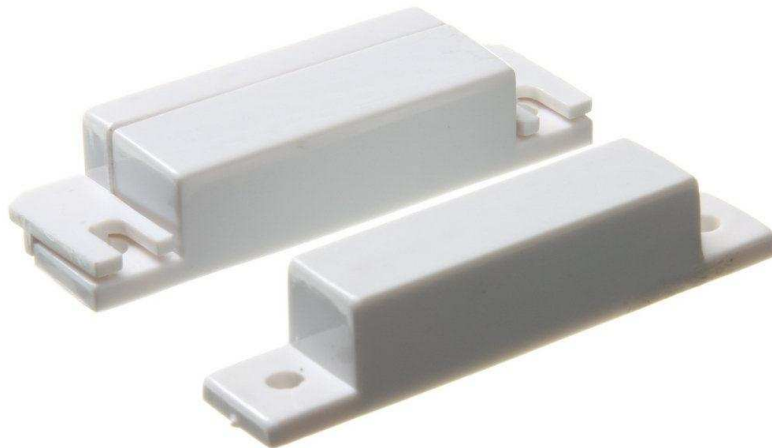


Figura 2.22 Sensor magnético

Para hacer uso de estas señales no se requiere ningún circuito adicional, pues se puede utilizar las entradas digitales de la DAQ, únicamente consiguiendo una conexión entre la tierra de la DAQ y el pin correspondiente, por lo cual la manera de determinar la detección o no de un fin de carrera, se definiría por la conexión/desconexión del pin de tierra de la DAQ a uno de los pines de la misma, lo cual vendría definido por la proximidad o no entre el emisor y

receptor del interruptor magnético, quien en uno de sus terminales tendría conectado dicho pin y en otro la tierra como muestra en la Figura 2.23.

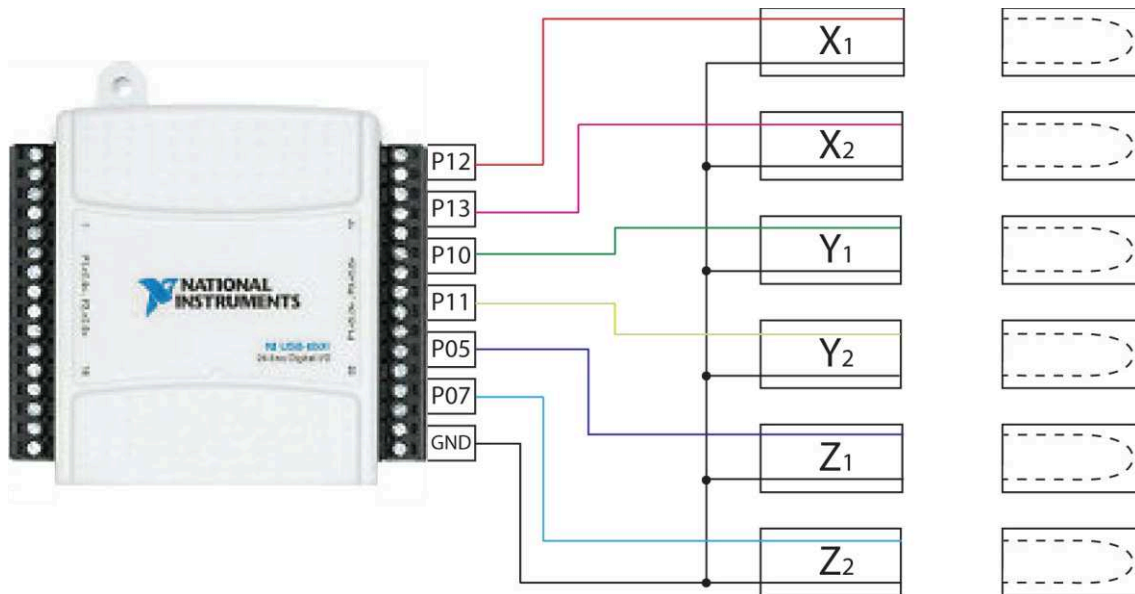


Figura 2.23 Conexiones de los sensores magnéticos

Cuando el emisor y el receptor se encuentran juntos se cierra el circuito y se envían 0L al pin de la tarea correspondiente de la USB NI USB-6501 (Figura 2.24), y de esta manera se puede a nivel de software evitar el envío de la secuencia de pasos en presencia de un fin de carrera y por ende detener su movimiento.

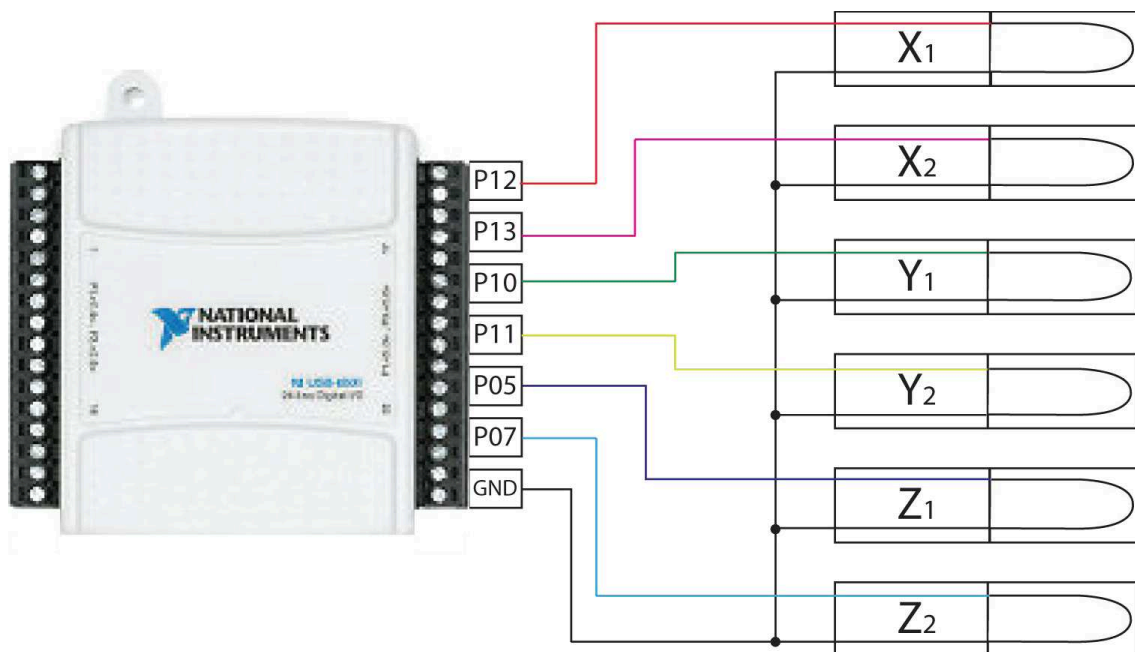


Figura 2.24 Circuito cerrado en los sensores magnéticos

## **2.8 FUENTES**

Para la aplicación se han visto necesarias tres fuentes de corriente continua. Una fuente de 5 V para el circuito de control, una de 12 V para el circuito de ventilación y una de 3.2 V para la alimentación de los 3 motores y sus respectivos controladores.

Dentro del circuito de control, la fuente de 5 V alimenta los integrados 74LS14 Schmitt Trigger que mejoran la calidad de las señales de la DAQ USB NI USB-6501, y adicionalmente actúa como fuente de control del sistema de acoplamiento. Esta fuente junto con la de 12 V son alimentadas por un mismo transformador de 120/12V<sub>ac</sub> con una capacidad de 1.5 A.

La fuente de poder DC restante de 3.2 V aproximadamente, es una fuente de potencia, que brinda una corriente máxima aproximada de 4 A y se utiliza para la alimentación de los 3 motores a pasos y sus respectivas tarjetas controladoras.

Esta fuente posee una capacidad de corriente alta debido a que cada motor paso a paso consume 1.3 A por bobina activada. Por lo tanto, esta fuente viene alimentada de un transformador 110/12V<sub>ac</sub> con una capacidad de 4 A.

### **2.8.1 FUENTE DE CORRIENTE CONTINUA 5V/1.5A**

Una fuente de DC tradicional se basa en 4 etapas básicas, una etapa de alimentación y transformación, que permite disminuir el voltaje, una de rectificación, una de filtrado y finalmente, una etapa de regulación, tal como se indica a continuación:

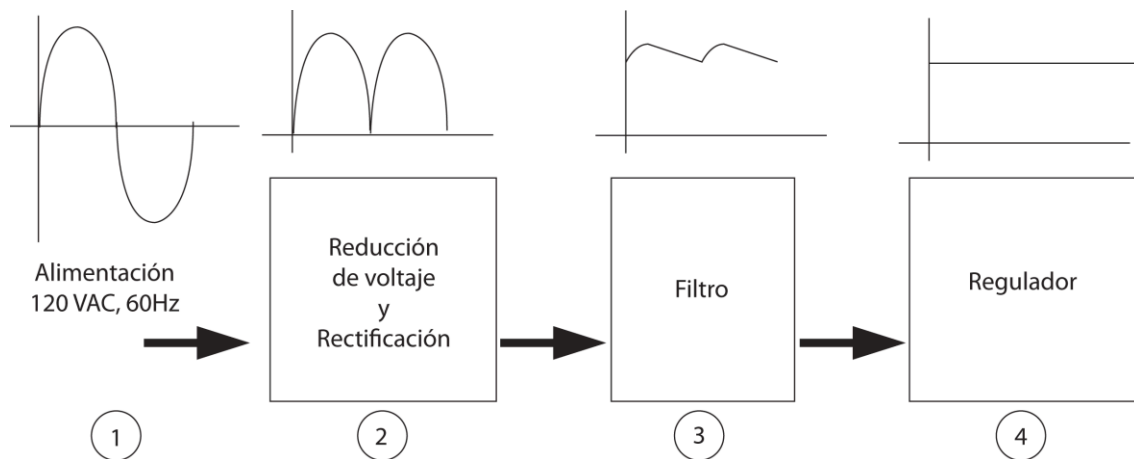


Figura 2.25 Etapas de la fuente de DC 1

1. La primera etapa es la encargada de suministrar la alimentación de la red a un transformador 120/12V<sub>ac</sub> de la capacidad adecuada.
2. La segunda etapa corresponde a la etapa de reducción de voltaje que viene de la conexión de uno de los taps del transformador, para de esta manera obtener un voltaje de salida menor (12V<sub>ac</sub>) y posteriormente una rectificación de onda completa mediante un puente de diodos.
3. La tercera etapa viene dada por un filtro capacitivo que tiende a linealizar la señal. Manteniendo un período de rizado igual a la mitad del período de la señal de la red.
4. La cuarta etapa es la etapa de regulación, en la cual se linealiza casi totalmente la señal del voltaje mediante el uso de los rectificadores integrados 7805 y 7812, para las salidas de 5 y 12V, respectivamente.

Los mencionados reguladores de voltaje de la serie 78XX, presentan las siguientes características técnicas [11]:

- Corriente de salida hasta 1.5A
- Protección de sobrecarga térmica interna
- Capacidad para alta disipación de potencia
- Limitación interna de corriente de corto circuito

El regulador 7805 y el 7812 se caracterizan por operar en el rango de temperatura de -40° Celsius a 125° Celsius. El voltaje mínimo de entrada de alimentación para el 7805 es de 7.3 V y para el 7812 es 14.6 V.

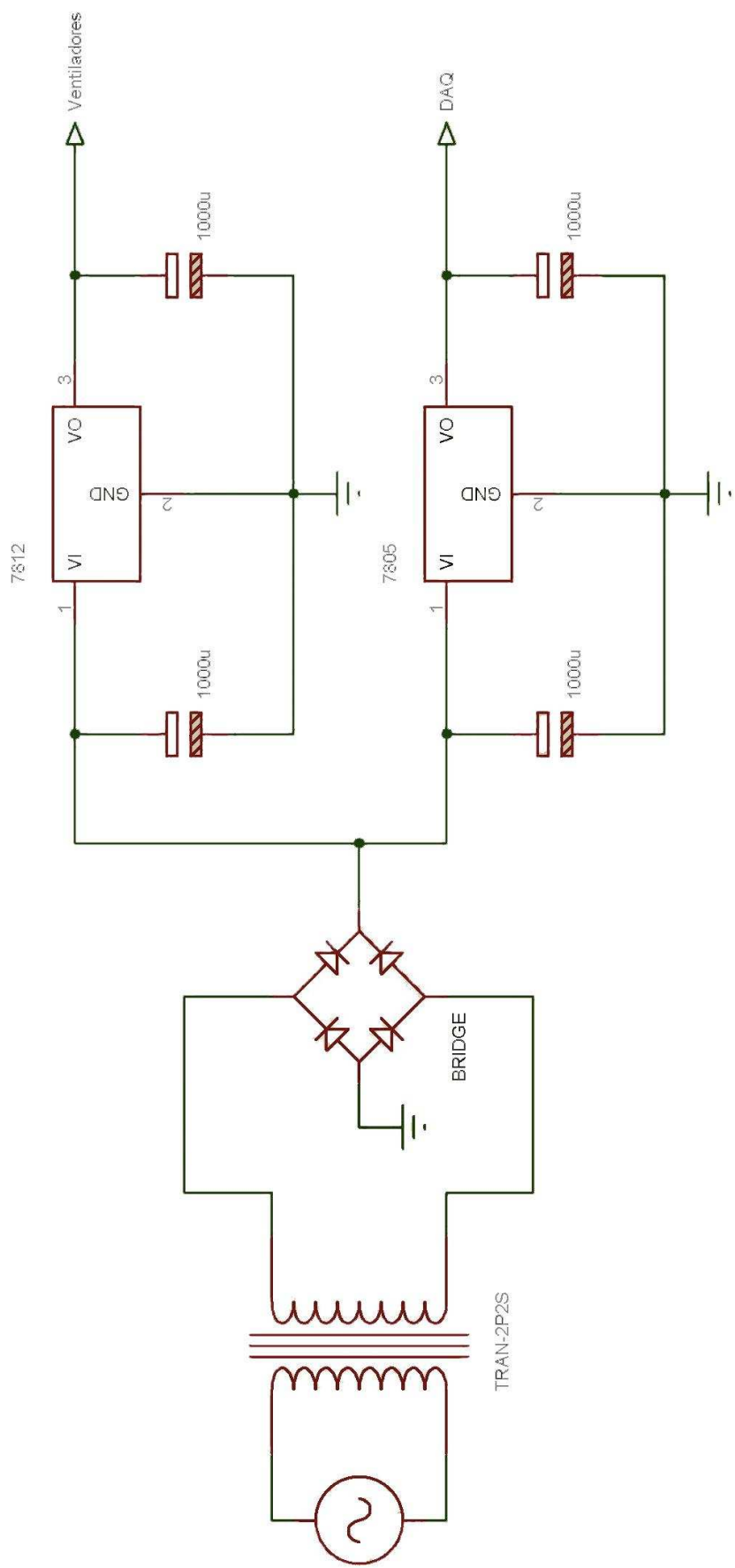


Figura 2.26 Fuente de control y ventilación

Uno de los valores que se considera de interés al momento de diseñar fuentes DC, es el voltaje de rizado en algunas de sus etapas, pues una fuente DC con excesivo rizado no sería recomendable para ninguna aplicación. Para obtener el rizado de voltaje se encuentra las siguientes ecuaciones:

### 2.8.1.1 Regulador de voltaje 7805

$$\begin{aligned}
 &= 12 \times \sqrt{2} = 16.97 \\
 , &= -2 = 16.97 - 1.2 = 15.77 \\
 &= 500 \\
 &= \frac{'}{2} \\
 &= \frac{500 \times 10^{-3}}{2 \times 1100 \times 10^{-6} \times 120} \\
 &= 1.89
 \end{aligned}$$

Donde:

$V_{ps}$  = voltaje pico en el secundario

$V_{c,max}$  = voltaje máximo capacitor (filtro)

$V_r$  = voltaje de rizado

$I_{dc}$  = corriente DC en la carga

### 2.8.1.2 Regulador de voltaje 7812:

$$\begin{aligned}
 , &= -2 = 16.97 - 1.2 = 15.77 \\
 &= 450 \\
 &= \frac{'}{2} \\
 &= \frac{450 \times 10^{-3}}{2 \times 1100 \times 10^{-6} \times 120} \\
 &= 1.7
 \end{aligned}$$

## 2.8.2 FUENTE DE CORRIENTE CONTINUA 3.2V/4A

Debido a que en total son 3 motores a pasos, se necesita una corriente alta para su funcionamiento, por lo que mínimo se requiere una alimentación con un transformador de 4 A. Es por ello que se diseña una fuente capaz de aprovechar al máximo dicha capacidad.

El diseño de esta fuente de potencia es sencillo, económico, pero de gran utilidad y eficiencia. Como bien se sabe la calidad de una fuente se mide en primera instancia por su estabilidad, es decir que tan susceptible o invariante es frente a una carga, y en segundo lugar por su capacidad de carga.

Para conseguir cada uno de estos requerimientos se hace uso de un diseño tradicional de fuente, con sus 4 etapas de reducción, rectificación, filtrado y regulación, pero adicionalmente se hace uso de un transistor de potencia 2N3055 que funciona como un “bypass” de corriente, ayudando de esta manera a superar las limitaciones que presentan los reguladores de la serie 78XX, quienes poseen una limitación de corriente de 1.5 A en su salida y donde su consumo se resumiría a la corriente de base del transistor de potencia (Figura 2.27).

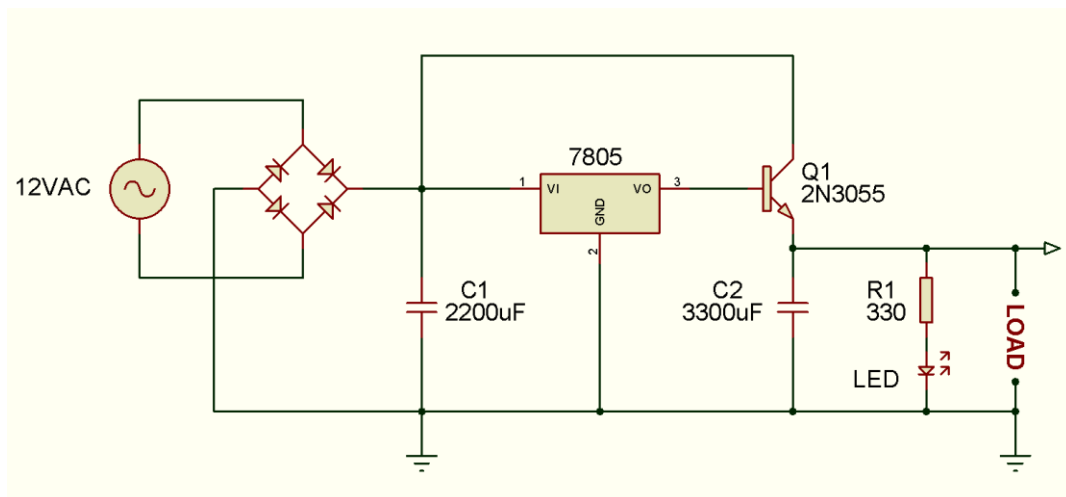


Figura 2.27 Fuente de potencia

Por lo tanto, con la ayuda del transistor de potencia NPN 2N3055 en modo de saturación se aprovecha casi totalmente la capacidad del transformador, pues la corriente que entra al colector del transistor sería la misma que genera el transformador, y de esta forma dimensionando cada uno de los elementos para manejar esta corriente se consigue el propósito deseado.

Dicha fuente como se observa, cumple con las 5 etapas antes mencionadas:

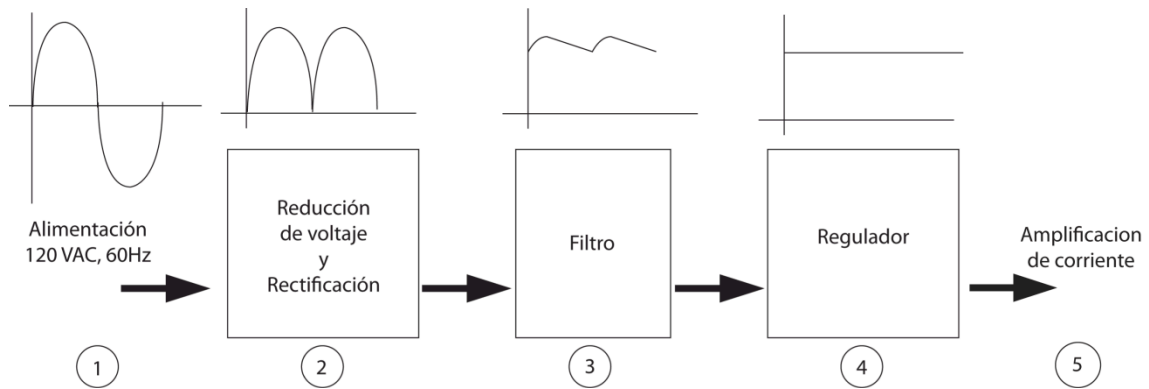


Figura 2.28 Etapas de la fuente de DC 2

Partiendo de la capacidad del transformador, se procede al diseño y dimensionamiento de algunos de los elementos que forman parte de la fuente de potencia.

Como bien se ha dicho la corriente máxima que ofrece el transformador vendría a ser la limitación en la capacidad de la fuente y por tanto la máxima corriente que debería soportar el transistor de bypass, es por esto que se elige el transistor NPN 2N3055 que cumple adecuadamente con los requisitos.

Especificaciones técnicas transistor NPN 2N3055 [11]:

- $I_C$  Collector Current: 15 A
- $V_{BE}$  Base-Emitter Voltage ( $I_C = 4A$ ): 1.8 V
- $V_{CEO}$  Collector-Emitter Voltage ( $I_B = 0$ ): 60 V

A partir de estos valores, se sabe que la máxima caída que existirá entre B-E del transistor de potencia será de 1.8 V, por tanto se asegura que el mínimo valor de voltaje que tendrá el emisor será de 3.2 V, al poseer un  $V_{base}$  totalmente estable e igual a 5 V a la salida del regulador 7805.

Adicionalmente se dimensiona el puente de diodos para una capacidad de corriente superior a 4 A, que sería la máxima limitación del circuito.

Como se ha dicho previamente, una de las etapas y características más importantes en el diseño de una fuente de DC, es el rizado, tanto en la entrada



con en la salida del circuito, es por esto, que se dimensiona el valor de los capacitores acorde a las necesidades, asegurando un correcta regulación y bajo nivel de rizado.

$$= 12 \times \sqrt{2} = 16.97$$

$$, = -2 = 16.97 - 1.2 = 15.77$$

Debido a que se trabaja con un regulador 7805, es indispensable asegurar un voltaje mínimo  $V_i$  de 7.3 V, para garantizar la regulación en la salida de 5V, es de esta manera, que:

$$\leq -7.3 = 15.77 - 7.3$$

$$\leq 8.47$$

$$\rightarrow = 8$$

$$, = + 7805$$

Donde  $I_{7805} \approx I_{base\_2N3055}$  y  $I_{base\_2N3055} = I_{colector\_2N3055} / h_{fe}$ , por tanto, si se tiene:

$h_{FE}$  (DC Current Gain) ( $I_C = 4A$ ): 70

$$, = 4 + \frac{4}{70} = 4.05$$

$$\geq \frac{4.05}{2}$$

$$\geq \frac{4.05}{2 \times 8 \times 120}$$

$$\geq 2109.4$$

$$\rightarrow = 2200 \quad (35 \text{ )}$$

$$\rightarrow = \frac{4.05}{2(2200)(120)} = 7.67$$

Donde:

$V_{ps}$  = voltaje pico en el secundario

$V_{c,max}$  = voltaje máximo capacitor (filtro)

$V_r$  = voltaje de rizado

$I_{dc}$  = corriente DC en la carga

Adicionalmente para garantizar que en la salida de la fuente de potencia se disponga de un rizado mínimo, se dimensiona un capacitor adicional de salida  $C_o$ , por tanto se tendría que los factores de rizado en la entrada y salida son:

$$\begin{aligned} &= \frac{I_{dc}}{4\sqrt{3} I_{L}} = \frac{I_{dc}}{4\sqrt{3} \left( I_{L} - \frac{I_{dc}}{2} \right)} \\ &= \frac{4.05}{4\sqrt{3} \cdot (15.77 - 3.84)(2200)(120)} \\ &\rightarrow \text{Factor} = 0.1856 \text{ (18.56\%)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Factor}_{sin} &= \frac{I_{dc}}{4\sqrt{3} I_{L}} = \frac{4}{4\sqrt{3} \cdot (3.2)(2200)(120)} = 0.6834 \text{ (68.34\%)} \\ &\rightarrow I_{L} = 2\sqrt{3} I_{dc} = 2(0.6834)(3.2)\sqrt{3} = 7.57 \end{aligned}$$

Lo cual resulta demasiado excesivo, por tanto se recalcula asumiendo un rizado menor a 3V, y se tiene:

$$\begin{aligned} &\geq \frac{I_{dc}}{2} \\ &\geq \frac{4}{2(3)(120)} = 5555,55 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\approx \left( \frac{I_{dc}}{2} + \frac{I_{dc}}{2} \right) \\ &\quad + \geq 5555,55 \\ &\quad \approx 3355,55 \\ &\rightarrow I_{dc} = 3300 \end{aligned}$$

Con lo cual, recalculando, se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Factor}_{con} &= \frac{I_{dc}}{4\sqrt{3} I_{L}} = \frac{4}{4\sqrt{3} \cdot (3.2)(2200 + 3300)(120)} \\ &\rightarrow \text{Factor}_{con} = 0.27 \text{ (27\%)} \\ &\rightarrow I_{L} = 2\sqrt{3} I_{dc} = 2(0.27)(3.2)\sqrt{3} = 2.9 \end{aligned}$$

Este valor de rizado se daría únicamente cuando coincidiera, la activación de tres motores al mismo tiempo, es decir cuando se presente un consumo de 4 A aproximadamente, sin embargo, bajo un consumo por bobina de 1.2 A, el valor de rizado sería menor a tres veces el calculado, es decir aproximadamente 0.96 V. Por lo cual, no se considera necesario, un filtro de mayor valor.

Y finalmente, para garantizar un rizado mínimo se dispone de un capacitor de 2200  $\mu\text{F}$  (35 V) en la entrada del regulador y un capacitor de 3300  $\mu\text{F}$  (50 V) a la salida, entre el emisor y tierra, que son los dos terminales donde deberá ser conectada la carga.

# CAPÍTULO 3

## DESARROLLO DEL SOFTWARE Y HMI

En este capítulo se pretende explicar el software y HMI desarrollados en National Instrument LabVIEW 2009, el cual se basa primordialmente en el procesamiento de imagen y control de los movimientos de los motores de cada eje, bajo las restricciones e instrucciones requeridas. Adicionalmente, se desarrolla un HMI amigable a cualquier usuario/operador, de manera que posea los controles e indicadores requeridos para la aplicación y sea de fácil uso.

### 3.1 PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS EN EL SOFTWARE

Existen seis procedimientos generales que se disponen para la aplicación: presentación, calibración mecánica, calibración de imagen, procedimiento de contorneado, desbastado y perforado indicado en la Figura 3.1:

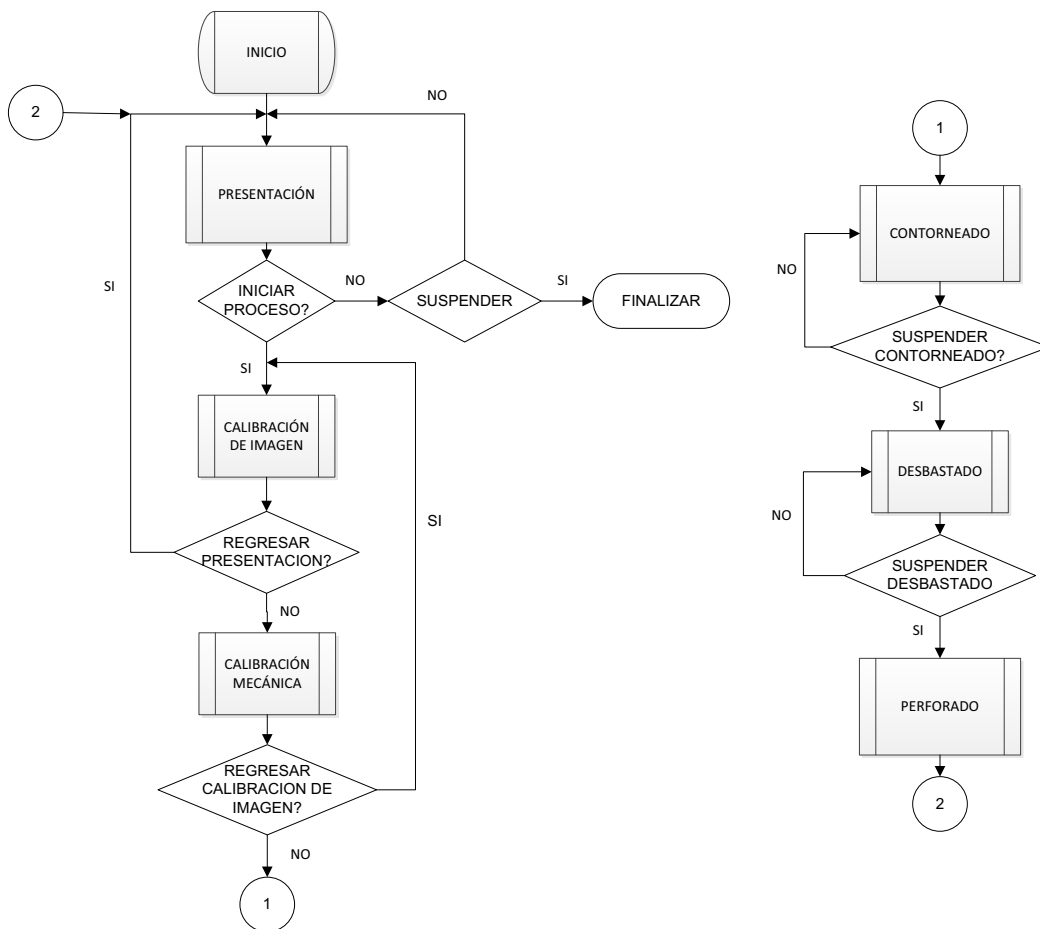


Figura 3.1 Procedimientos generales

### 3.1.1 PRESENTACIÓN

La etapa de presentación como su nombre lo indica no posee funcionalidad dentro del procedimiento, sino mas bien da información del HMI y una etapa de no ejecución. Esta primera etapa, por tanto, da la posibilidad mediante dos controles, de comenzar o terminar la ejecución del VI.

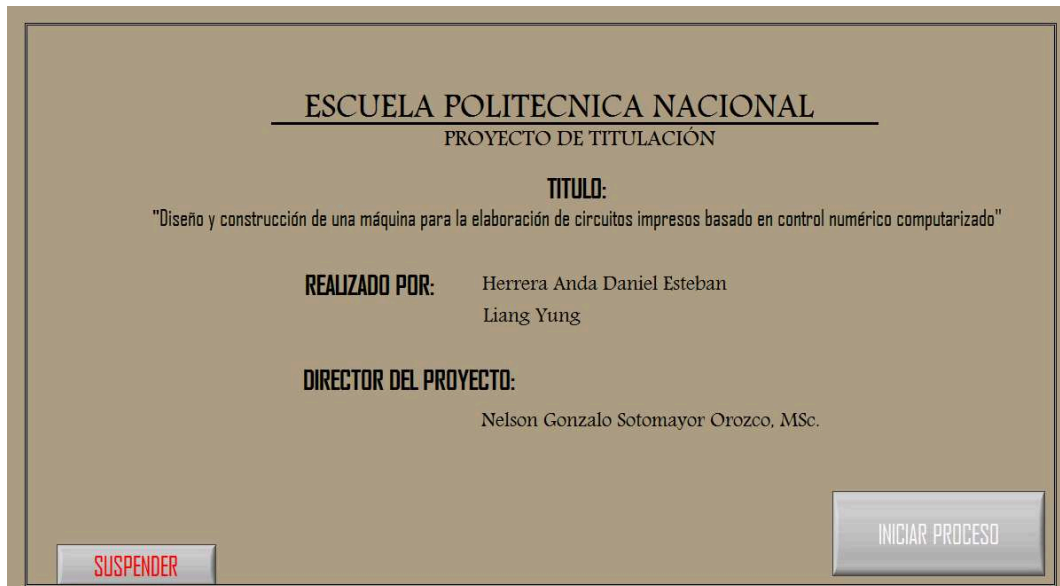


Figura 3.2 Pantalla de presentación

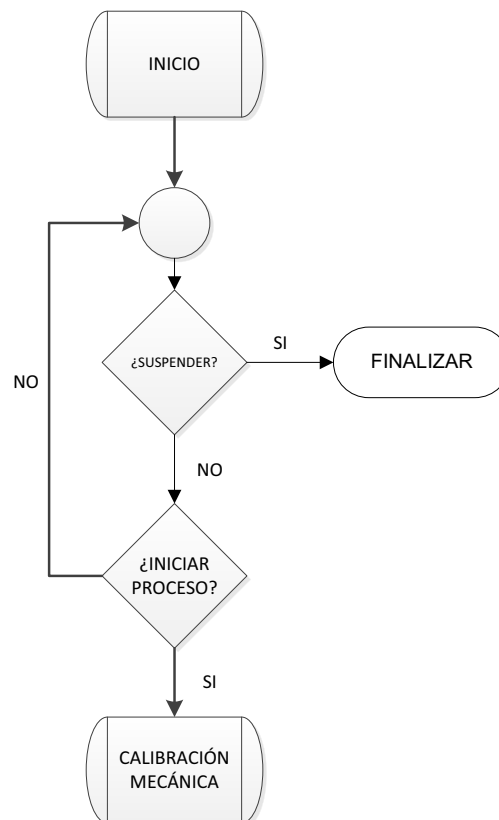


Figura 3.3 Procedimiento de presentación

### 3.1.2 CALIBRACIÓN DE IMAGEN

Partiendo de una imagen exportada por los programas de circuitos impresos como es Proteus Professional en formato .jpg o .png, se procede a la selección y procesamiento de dicha imagen, realizando en primera instancia un ajuste de umbral que permite definir más adecuadamente el contorno de la imagen binarizándola en los valores de 255 y 0, para los colores blanco y negro, respectivamente. Pues en una imagen digital a escala de grises de 8 bits cada punto de la imagen posee un valor comprendido entre 0-255. Donde el color blanco es el máximo valor de la escala (255) y el color negro es el valor mínimo de la escala (0). En conclusión una imagen en escala de grises posee 256 tonos de gris, efecto que es más notorio en los bordes de dicha imagen, es decir donde el tono pasa de blanco a negro. Es por esto que para esta aplicación, binarizar la imagen significa bordes totalmente definidos y por ende un cálculo adecuado de la trayectoria de dichos bordes por medio de los filtros de Canny.

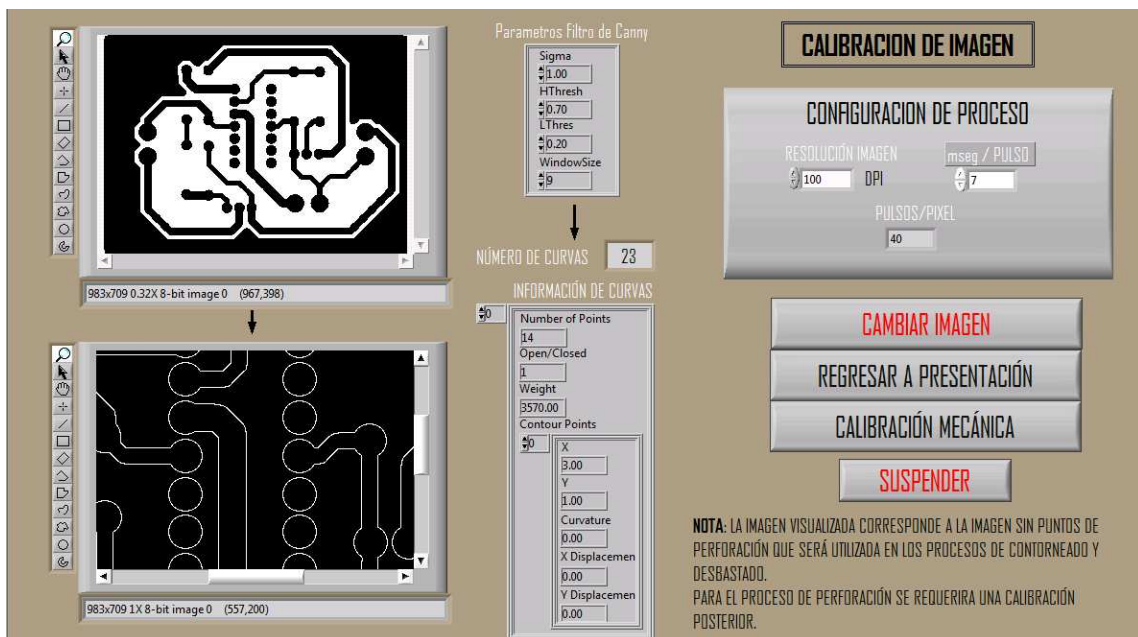


Figura 3.4 Pantalla de calibración de imagen

Para esto, los tonos comprendidos entre el valor 1 y 127 se sustituyen por 0 que es el tono negro. Asi mismo valores de tono entre 128 y 254 se sustituyen por 255 que es el tono blanco (Figura 3.5).

Además, se procede a disponer un bloque de expansión de imagen en caso de ser requerido, aunque esto no es recomendable porque se puede tener una imagen muy pixelada, por lo cual se recomienda una calidad óptima de 400 dpi.

Adicionalmente LABVIEW ofrece la posibilidad de un manejo de imagen representándola como una matriz, hecho que resulta de gran ayuda en el proceso de desbastado donde se realiza un análisis punto a punto, es por esto que en este proceso además de obtener las trayectorias de bordes requeridas en el proceso de contorneado se obtiene la matriz de la imagen para el proceso del desbastado.

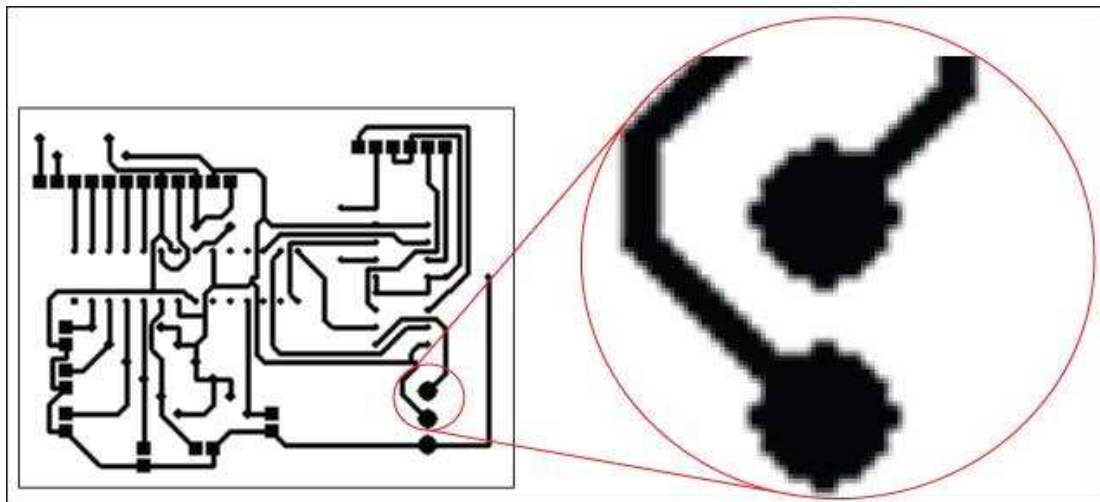


Figura 3.5 Imagen a escala de grises

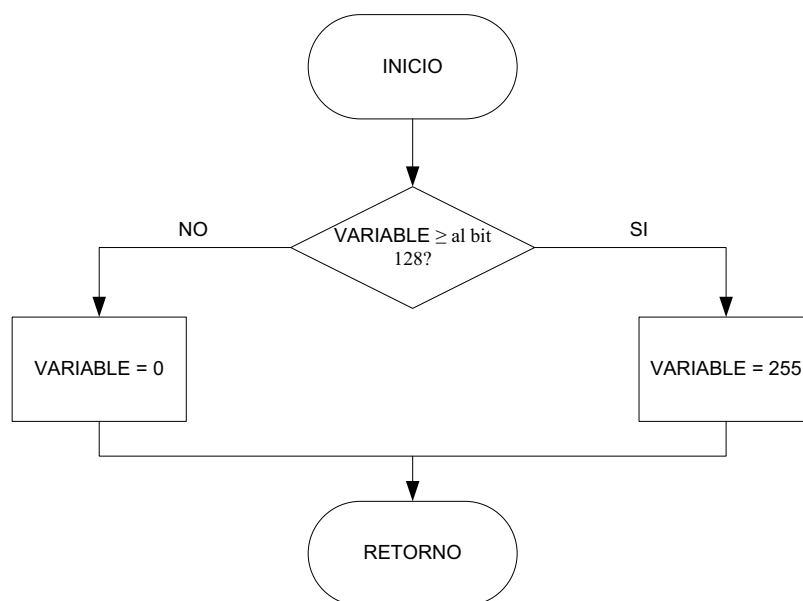


Figura 3.6 Simplificación de variables

### 3.1.2.1 Extracción de curvas

Este procedimiento permite extraer las curvas de la imagen utilizando el Toolkit Vision and Motion de National Instrument que facilita de gran manera el trabajo de elaborar completamente el Algoritmo de Canny<sup>1</sup>, gracias al bloque IMAQ CannyEdgeDetection, el cual es un algoritmo de múltiples etapas que permite detectar una amplia gama de bordes de imágenes y el bloque IMAQ GetPointsOnContour el cual regresa el número de segmentos y las coordenadas de cada pixel de cada segmento (Figura 3.7 y Figura 3.8).

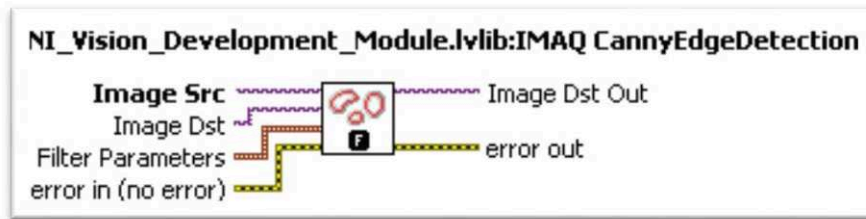


Figura 3.7 Detección de borde con el Algoritmo de Canny

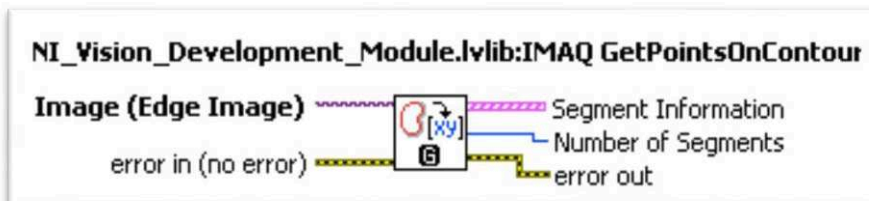


Figura 3.8 Segmentación de bordes

En la Figura 3.9 y la Figura 3.10 se muestra un ejemplo de la detección de bordes. Cada borde es un gráfico cerrado o abierto.

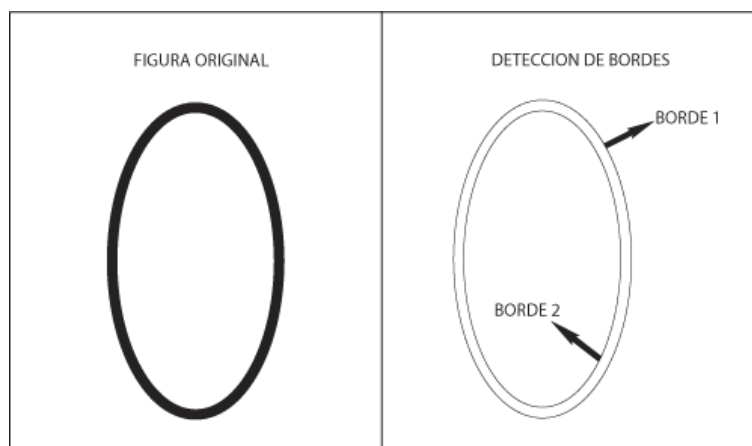


Figura 3.9 Detección de bordes

<sup>1</sup>Es usado para detectar todos los bordes existentes en una imagen y está considerado como uno de los mejores métodos de detección de contornos mediante el empleo de máscaras de convolución y basado en la primera derivada. Los puntos de contorno son zonas de píxeles en las que existe un cambio brusco de nivel de gris.



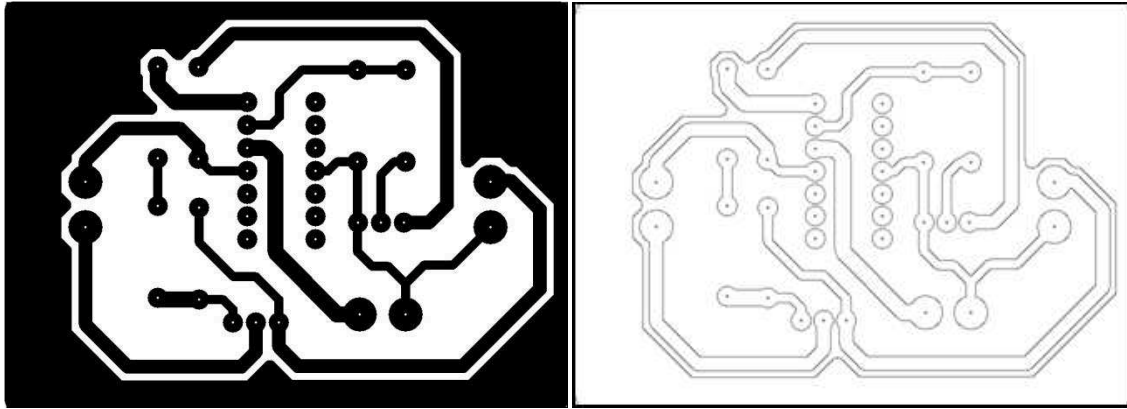


Figura 3.10 Ejemplo detección de bordes Algoritmo de Canny

### 3.1.2.2 Eliminación de partículas

El proceso de agrupación de píxeles introduce el término conectividad. NI Vision trabaja con conectividad-4 y conectividad-8. Conectividad-4 considera que dos píxeles son parte de la misma partícula si son verticalmente u horizontalmente adyacentes. En cambio, con conectividad-8 se considera que dos píxeles son parte de la misma partícula si son verticalmente, horizontalmente o diagonalmente adyacentes.

Es así que haciendo uso del bloque Remove Particle (Figura 3.11) del toolkit Vision and Motion, se puede eliminar las partículas que forman parte de los puntos de perforación utilizando dicho proceso de agrupación de píxeles con conectividad 8 y de esta manera, trabajar con una imagen sin puntos de perforación dentro de los procesos de contorneado y desbastado, previniendo así un desgaste excesivo de los mismos. El resultado de este bloque convierte la imagen como se muestra en la Figura 3.12.

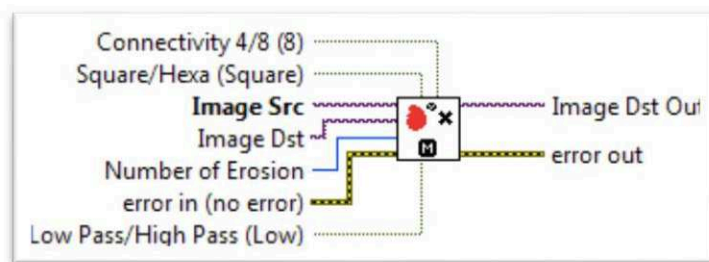


Figura 3.11 Bloque de eliminación de las partículas

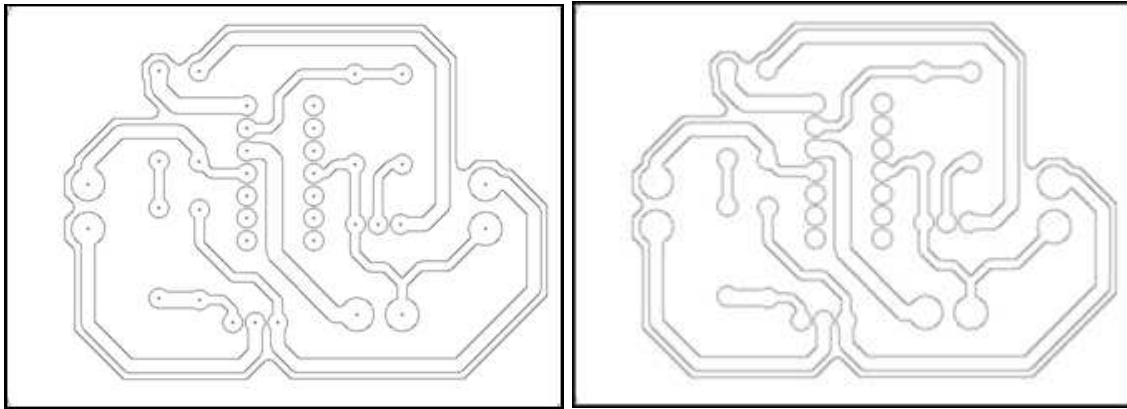


Figura 3.12 Ejemplo de la eliminación de las partículas

### 3.1.2.3 Conversión de imagen a matriz

Para este procedimiento se hace uso del bloque ImageToArray (Figura 3.13), disponible en el toolkit Vision and Motion, el cual representa los pixeles de la imagen en un arreglo de dos dimensiones. En este caso la imagen es de 8 bits, por lo que se trabaja con un arreglo del mismo tipo.

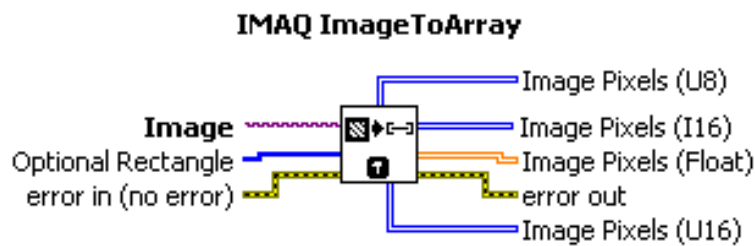


Figura 3.13 Conversión de imagen a matriz

Esta conversión facilita en gran medida a nivel del programa en la etapa de desbastado. Ya que la matriz está identificada con números de filas y columnas, cuyos valores identifican a su vez el tamaño de la imagen. Por ejemplo, si se tiene una imagen de tamaño 120 x 100 pixeles, la conversión será una matriz de dos dimensiones de 120 columnas y 100 filas. Y debido a que en el “Procesamiento de Imagen” la imagen es binarizada, la elaboración del algoritmo para desbastar la capa excesiva de cobre se resumiría a levantar la herramienta cuando exista 0 en la matriz y a descenderla cuando el valor sea igual a 255. En la Figura 3.14, se presenta el resultado de la conversión de imagen a matriz de una imagen binarizada.

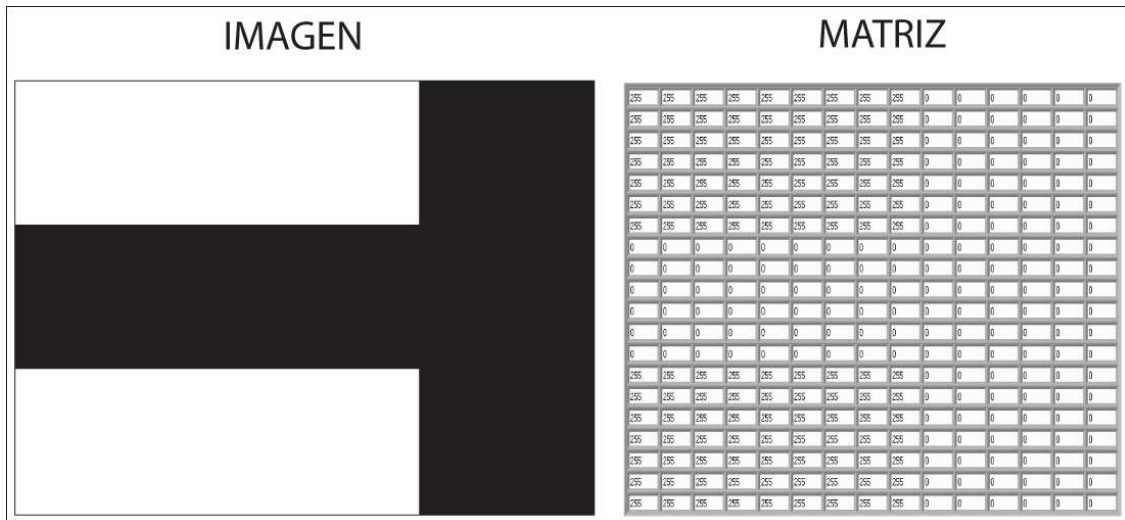


Figura 3.14 Conversión de imagen a matriz

### 3.1.3 CALIBRACIÓN MECÁNICA

Dentro de esta etapa del procedimiento se pretende dar una adecuada ubicación inicial a la herramienta de fresado, acorde en primera instancia a las dimensiones del PCB a realizar, considerando su punto inferior izquierdo como el punto de referencia (0,0). Es por esto que en la etapa de calibración mecánica se coordina los movimientos del taladro (herramienta) en cada uno de sus ejes para conseguir, además del punto de referencia 0, un contacto inicial con la capa de cobre que permita identificar y/o referenciar una altura de desbaste adecuada.



Figura 3.15 Pantalla de calibración mecánica

Para ello se hace uso de un manejo a nivel de HMI y uno desde un mando manual externo (joystick) para cumplir con dicho propósito y adicionalmente dos puntas que hagan posible el contacto eléctrico entre la placa de cobre y la herramienta de fresado.

Para el mando manual con Joystick Genius USB-F23 a nivel de programa se trabaja de manera empírica, pues los valores transferidos del joystick por medio del conversor A/D de las señales de los potenciómetros circulares y perpendiculares del mismo no son del todo estables, y presentan una alta sensibilidad. Por lo que mediante código se genera una histéresis acorde a los valores empíricos, que impida movimientos involuntarios, rechazando todos los valores por debajo o encima de los límites fijados. De esta manera, además de coordinar la dirección del movimiento voluntario del joystick se coordina con temporizaciones de lazo, la velocidad de movimiento en cada uno de sus ejes, haciéndolo más lento o más rápido, conforme se encuentre en una posición más próxima o más inclinada al eje de estabilidad, respectivamente. Adicionalmente se dispone de una palanca auxiliar que permite tener un tercer eje de movimiento Z con dos estados de movimiento continuo, y cuatro botones para movimiento continuo en los ejes X,Y y en sus dos sentidos respectivos.

Dentro del HMI se dispone de un joystick virtual, que en caso de un fallo o ausencia del joystick real puede ser de utilidad, sin embargo éste se limita a movimientos continuos en los ejes X y Y, y movimientos paso a paso en el eje Z. Dicho mando está disponible tanto en ausencia o presencia del joystick real.

Dentro de la calibración mecánica cada motor se controla de manera paralela como se indica en la Figura 3.16. Por lo tanto, se puede efectuar el movimiento de los 3 motores simultáneamente y a su vez controlando la velocidad con el tiempo de ciclo al que trabaja, mientras menor sea el tiempo mayor será la velocidad de avance en cada eje, viéndose a su vez limitado por la velocidad de respuesta de las bobinas de los motores paso a paso.

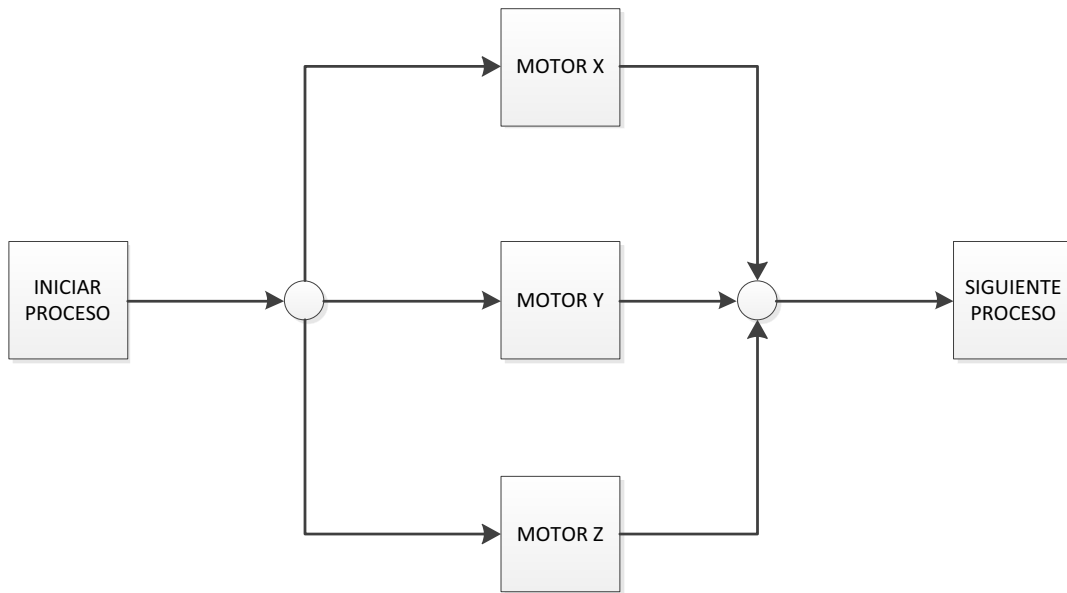


Figura 3.16 Diagrama de bloques calibración mecánica

Para el control directo de los motores paso a paso, a nivel de software, se trabaja la secuencia de pasos digital-binaria con su equivalente numérico por facilidad de programación, por ejemplo 1000, correspondería a 8, 0100 a 4, 0010 a 2 y, finalmente 0001 a 1.

Es por esto que, dentro de LABVIEW, el envío de la secuencia vendrá precedido siempre por una conversión de un número a una variable binaria para la excitación de cada bobina del motor.

Cuatro de los ocho bits de la variable booleana dentro de LABVIEW son enviados a cada motor, un pulso por motor para cada paso de la secuencia. Por lo tanto, para el giro del motor en sentido horario el incremento de la variable numérica debe ser 1, 2, 4, 8. Y para el giro del motor en sentido antihorario el decremento de la variable numérica será 8, 4, 2, 1.

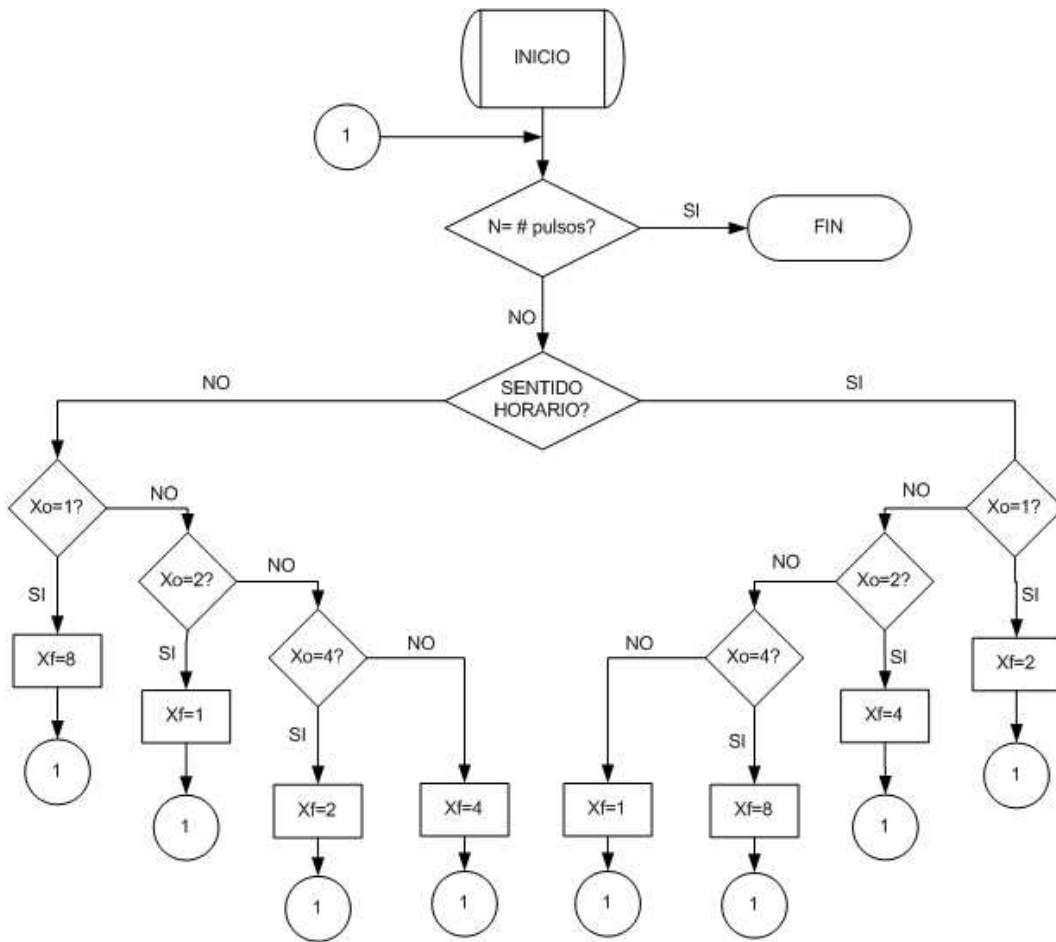


Figura 3.17 Activación del motor a pasos

De esta manera, haciendo uso de registros de desplazamiento dentro de LABVIEW, se consigue memorizar la posición del motor desde la etapa de calibración y durante cada uno de los procesos, y evitar de esta manera la descoordinación de secuencias de pulsos a los motores, que podrían significar la pérdida de una referencia y por ende un trabajo disparejo entre cada uno de los procesos. Para evitar el sobrecalentamiento y consumo innecesario de energía a nivel de hardware, se toma especial atención en el programa evitando pulsos mantenidos a los motores en las salidas digitales de la DAQ, por lo que en ausencia de movimiento se debe evitar mantener la última bobina de la secuencia activada, ya que el consumo de energía de dicha bobina resultaría en una carga adicional innecesaria para el sistema. Por lo que en sucesión al envío de un pulso se coloca en nivel 0 a cada una de las bobinas del motor en espera de un próximo pulso.

El hardware del CNC presenta adicionalmente 6 sensores magnéticos que impiden el desplazamiento sobre las limitaciones de los tornillos sin fin, que podrían atentar contra la integridad del eje de soporte, anclaje motor-eje o en el peor de los casos motor paso a paso.

Por lo cual cada una de estas señales digitales es leída en LABVIEW y se convierte en un requisito al momento de realizar un movimiento en cada uno de los ejes y en cada uno de sus sentidos, pues limitan el envío de la secuencia si existe sobre-desplazamiento. La lógica que gobierna los sensores en los ejes X, Y y Z, se presenta en las Figura 3.18, Figura 3.19 y Figura 3.20.

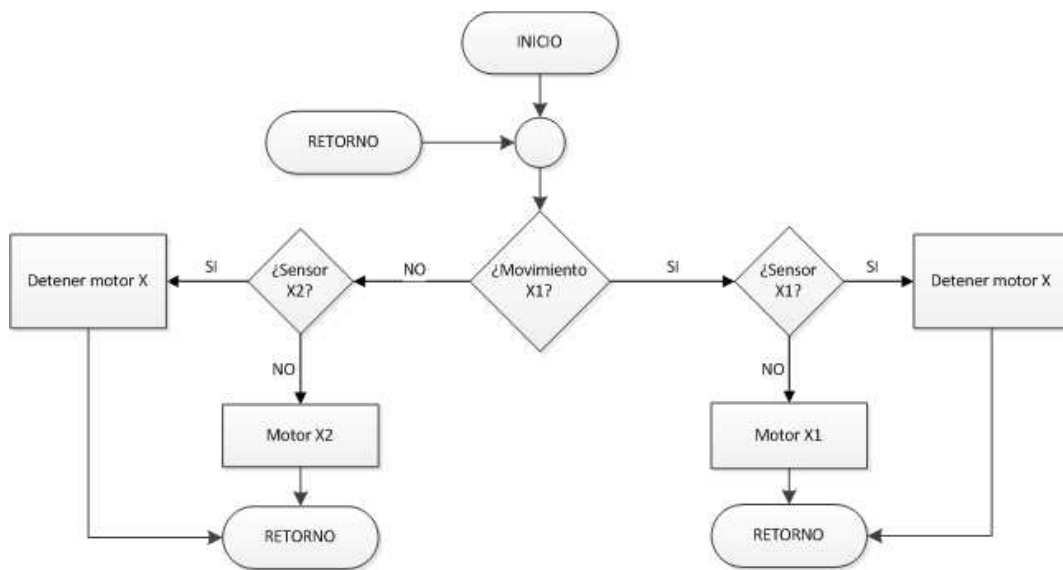


Figura 3.18 Movimiento motor X

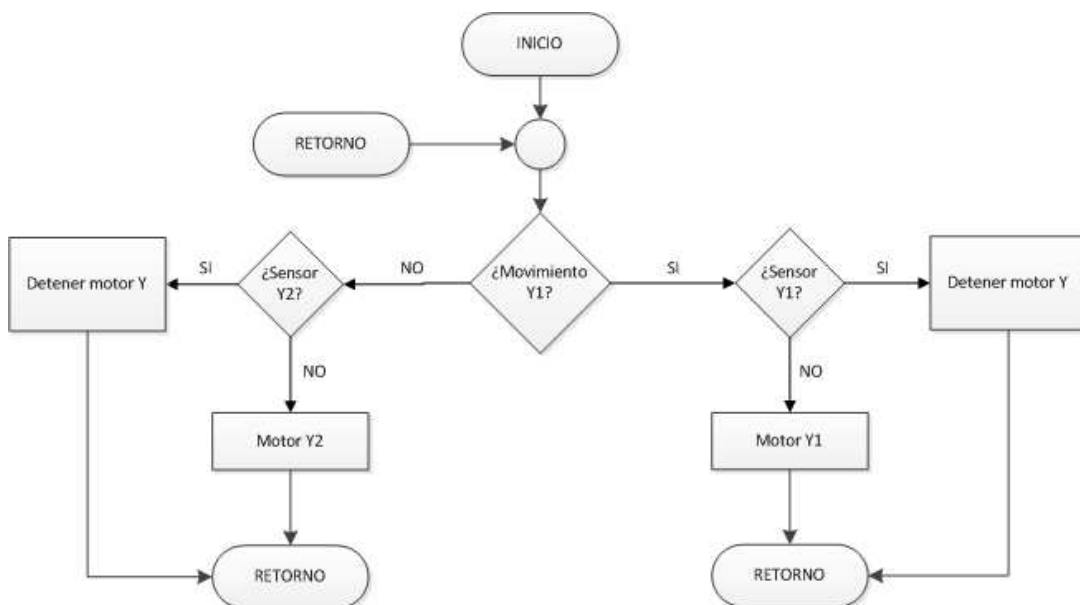


Figura 3.19 Movimiento motor Y

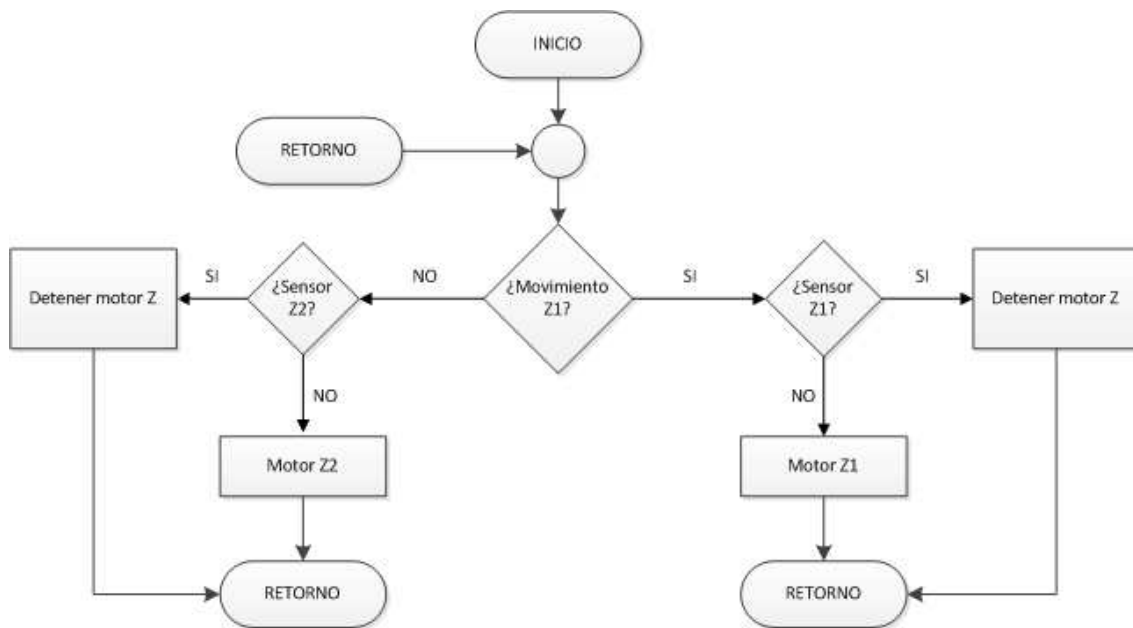


Figura 3.20 Movimiento motor Z

Tabla 3.1 Nomenclatura

<i>Nomenclatura</i>	<i>Significado</i>
Sensor X1	Sensor magnético eje X derecha
Sensor X2	Sensor magnético eje X izquierda
Sensor Y1	Sensor magnético eje Y posterior
Sensor Y2	Sensor magnético eje Y frontal
Sensor Z1	Sensor magnético eje Z superior
Sensor Z2	Sensor magnético eje Z inferior
Movimiento X1	Movimiento de eje X hacia derecha
Movimiento Y1	Movimiento de eje Y hacia posterior
Movimiento Z1	Movimiento de eje Z hacia superior
Motor X1	Avance motor X sentido horario
Motor X2	Avance motor X sentido antihorario
Motor Y1	Avance motor Y sentido horario
Motor Y2	Avance motor Y sentido antihorario
Motor Z1	Avance motor Z sentido horario
Motor Z2	Avance motor Z sentido antihorario
Contacto	Detección de contacto entre el taladro y el cobre de la tarjeta



Debido a que ubicar la fresa a una altura de referencia siempre igual sería imposible pues los movimientos de la fresa al acercarse al PCB son prácticamente imperceptibles a pequeña escala, se hace uso de las “pinzas de contacto”, los cuales permiten crear dos contactos eléctricos al ser sujetados, uno en la placa de cobre y otro en la herramienta de fresado, de esta manera se consigue un nivel de referencia siempre igual al unir dichos contactos.

Cuando ambos elementos cierran el circuito, la señal es enviada a la DAQ y el motor a pasos del eje Z se detiene automáticamente debido a esta restricción, y por tanto, estará listo para continuar a los procesos de contorneado, devastado y perforado. El algoritmo en el que se basa la calibración mecánica se encuentra en la Figura 3.21.

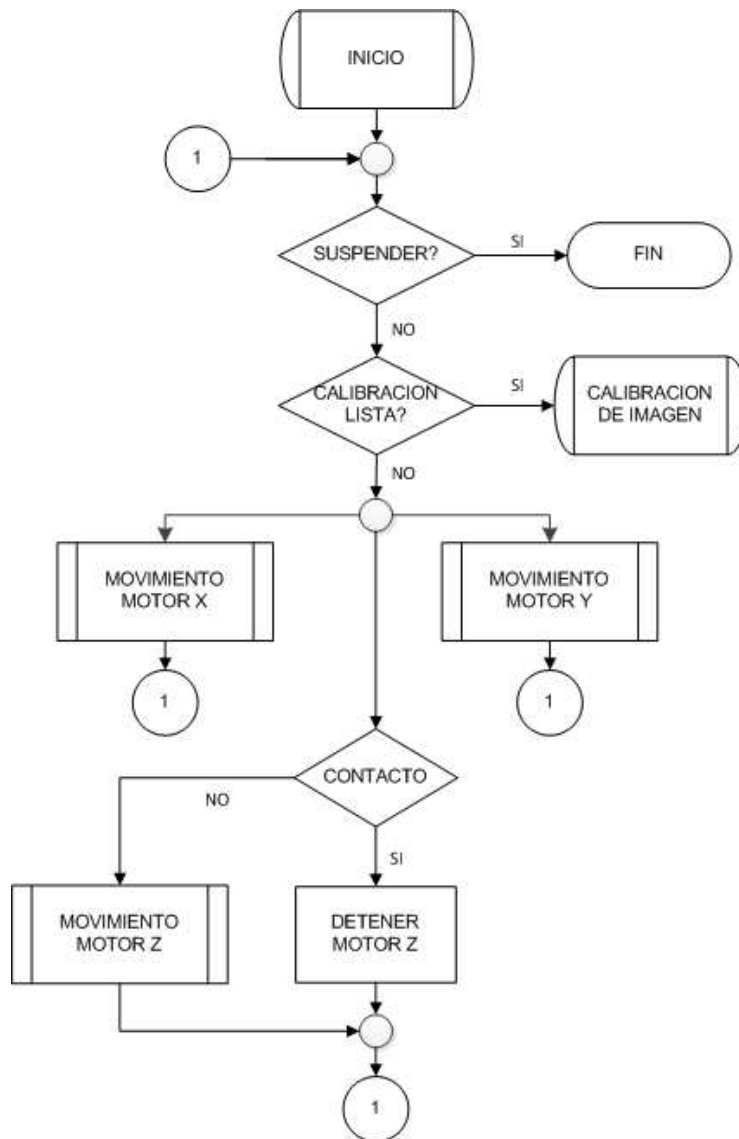


Figura 3.21 Calibración mecánica

### 3.1.4 CONTORNEADO

El procedimiento que se realiza al momento del contorneado consiste en “desindexar” cada una de las curvas previamente adquiridas por el filtro de Canny haciendo uso de dos contadores a manera de estructuras “for” anidadas, donde el primer contador será el encargado de elegir la curva y el segundo contador de seleccionar punto a punto o, pixel a pixel cada punto de la trayectoria seleccionada por el primer contador.

Luego de “desindexar” cada punto de una trayectoria se debe considerar desplazamientos desde el punto final de una trayectoria hacia el punto inicial de la siguiente con la herramienta de fresado apagada y levantada, para esto se procede a crear subVIs que definan, además del número de pulsos, cada una de las acciones de mando como son subir o bajar la punta de fresado, mover o no cada uno de los ejes, en movimientos coordinados, independientes o simultáneos, encender o apagar el taladro, etc.

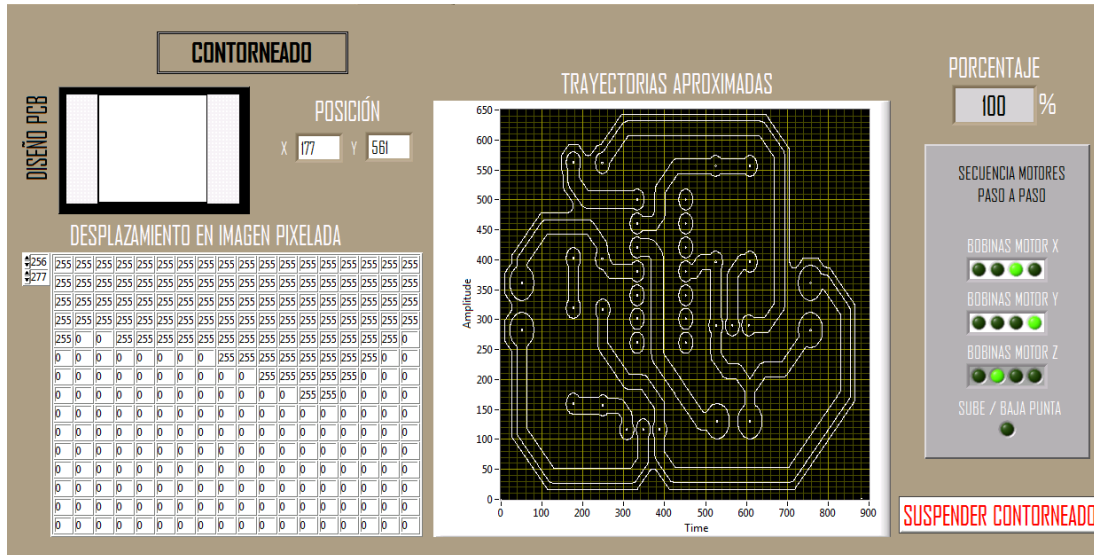


Figura 3.22 Pantalla de contorneado

Si se analiza el tipo de proceso que se realiza, se nota claramente que se requiere un movimiento simultaneo únicamente de los motores X,Y para realizar trayectorias curvas y diagonales, incluir un movimiento en Z simultaneo además de crear problemas de sincronismo en el programa trae retardos innecesarios y consumo excesivo de memoria del CPU, haciendo más lenta la

ejecución del programa, es por esto que para este proceso se considerada que el código que comanda el motor del eje X y el que comanda el motor del eje Y trabajen en forma paralela, e independientemente al código que comanda el motor del eje Z.

De esta forma también se garantiza que la herramienta de fresado no sea levantada antes de haber concluido la trayectoria.

Es por esto que el motor Z trabaja exclusivamente en el proceso de posicionamiento entre curvas, quien sube la herramienta cada vez que termina un contorno y baja al ubicarse en la posición inicial del contorno siguiente.

Además es importante considerar que cuando baja la herramienta por efecto del motor Z la herramienta de fresado encendida descenderá una distancia adicional a la posición del contacto entre la fresa y el cobre, previamente definida, para así poder desbastar el cobre y continuar con su trayectoria.

En la Figura 3.23 4se indica el diagrama de flujo en la etapa de contorneado.

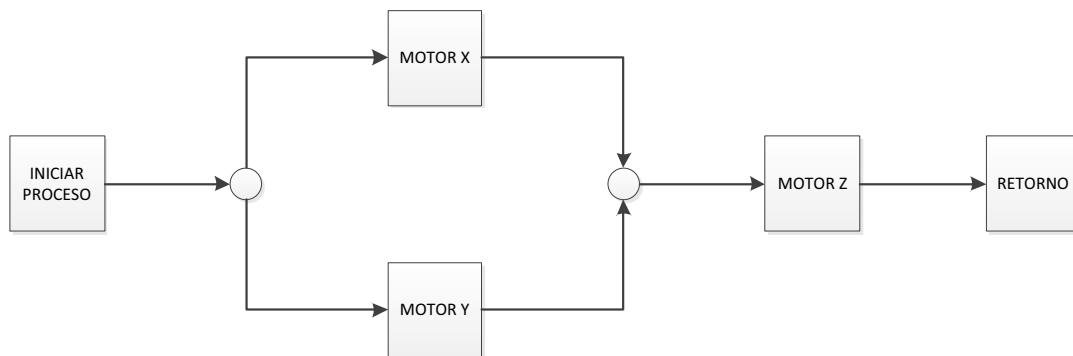


Figura 3.23 Diagrama de bloque contorneado

Este procedimiento tomará como referencia para cada una de sus curvas, la referencia cero previamente dispuesta en el proceso de “Calibración Mecánica”.

Donde, además se ha memorizado y/o definido una altura referencial de contacto con la placa, a partir de la cual, como se ha mencionado, de manera empírica se ha determinado el número de pulsos adecuado para desbastar el

cobre de un PCB, pues en general las tarjetas independientemente del material poseen una cobertura de cobre prácticamente igual.

Después de la elaboración de los contornos, la herramienta será posicionada en la referencia cero, para continuar con el siguiente proceso.

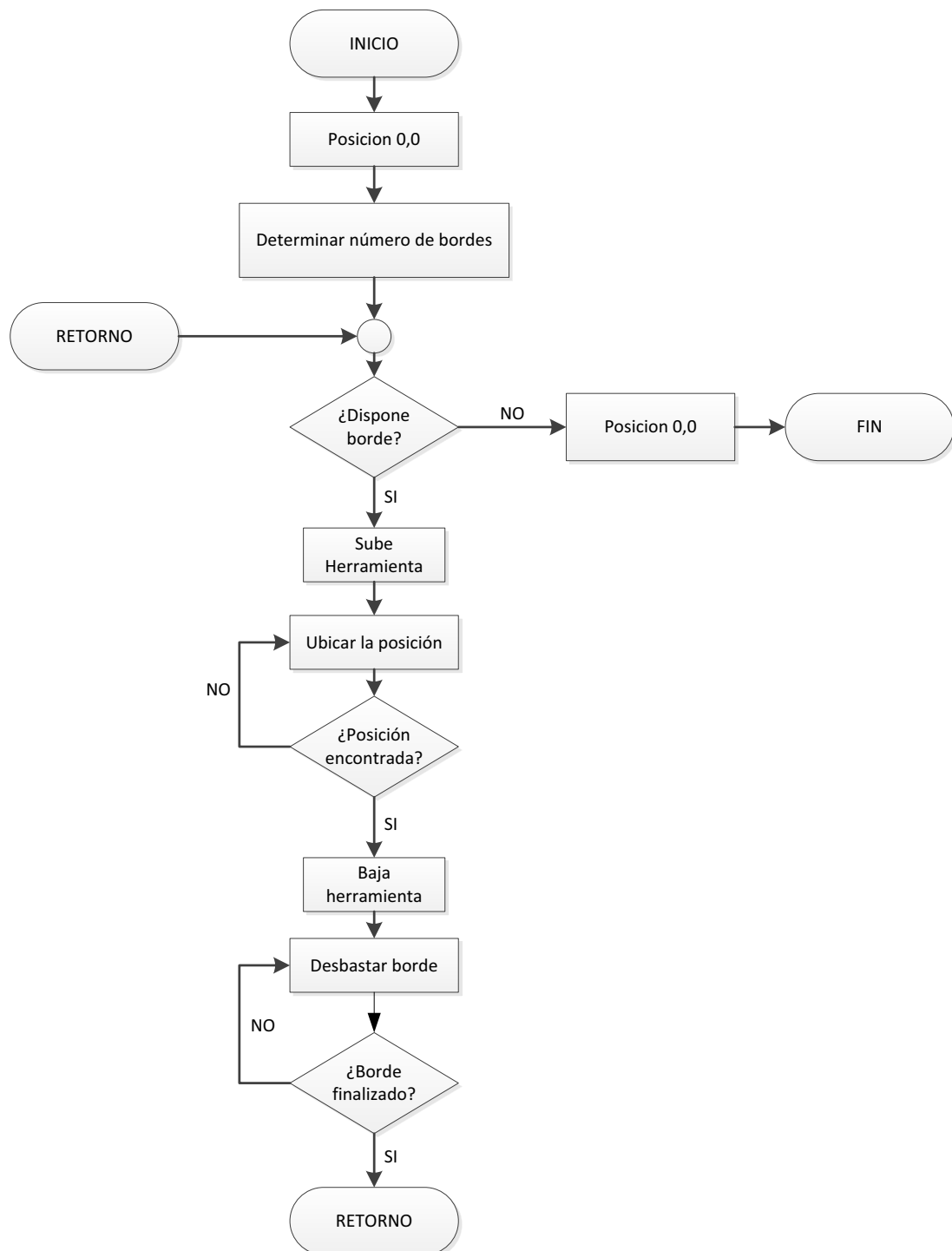


Figura 3.24 Contorneado

### 3.1.5 DESBASTADO

El proceso del desbastado es el encargado de, como su nombre lo indica, desbastar el cobre que no forme parte de las pistas o de la malla de tierra previamente definida en el diseño del PCB.

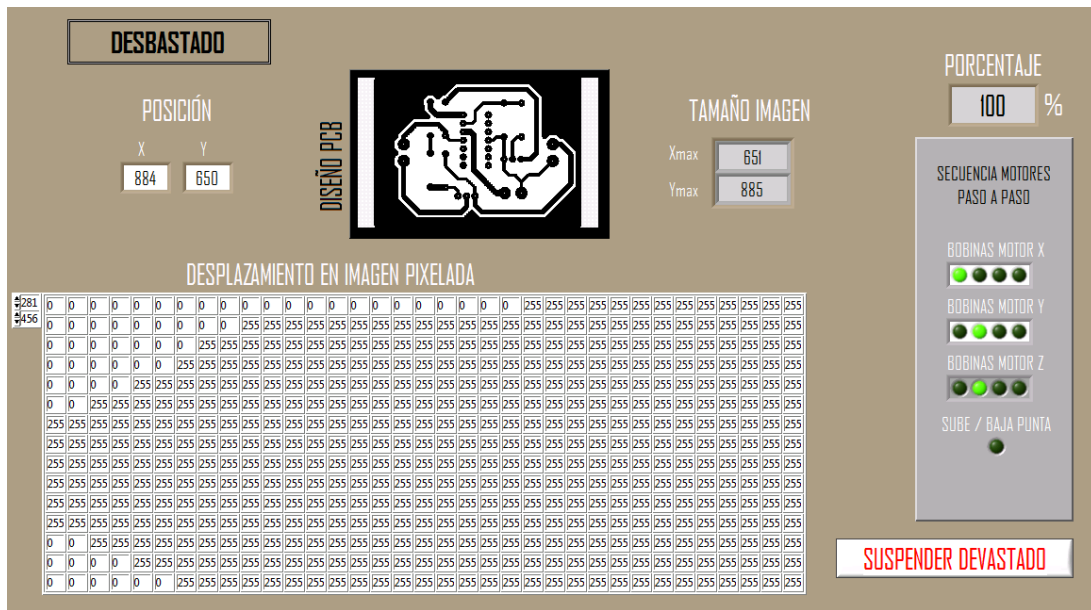


Figura 3.25 Pantalla de desbastado

De acuerdo al último paso del proceso anterior, la herramienta de fresado se ubica en la posición inicial 0,0 de referencia, posición que para el propósito coincide con la posición 0, Ymax de la imagen representada como matriz. A partir de este punto se efectúa movimientos rectilíneos X o Y punto a punto, de manera que se consiga un desbaste adecuado.

Es así que la herramienta de fresado debe a su vez asegurarse que los movimientos de subir o bajar se efectúen únicamente en el momento que se encuentre en zona de desbaste y se produzca un cambio de tono, es decir de negro a blanco y viceversa, o de 0 a 255 y viceversa, respectivamente.

Por tanto, se produce un movimiento de barrido desde el punto inicial de la matriz, en un proceso de desbaste fila a fila, primero de izquierda a derecha y posteriormente de derecha a izquierda, empezando desde la fila inferior,

hasta conseguir la máxima posición vertical. Es importante considerar que el diámetro de la fresa puede producir pequeños desgastes en las zonas de no desbastado, por lo cual se delimita en la medida de lo posible dichas zonas. Para ello se hace que los movimientos de ascenso y descenso de la herramienta únicamente se realicen en la zona de desbastado, es decir cuando el pixel es igual a 255, caso contrario el movimiento debe permanecer en el sentido definido.

Claramente se puede observar que al poseer movimientos verticales y horizontales totalmente independientes, transversales y longitudinales, respectivamente, los movimientos deben asegurarse como secuenciales e independientes de otros movimientos en otros ejes, para evitar trayectorias curvas o diagonales que modifiquen la forma ortogonal del desbastado, es por esto que a nivel de software para obtener una mayor eficiencia de programación, es decir una ejecución sin retardos innecesarios, además de cumplir con requisitos de ortogonalidad, se elabora el programa de manera secuencial o serie, como se indica en la Figura 3.26.

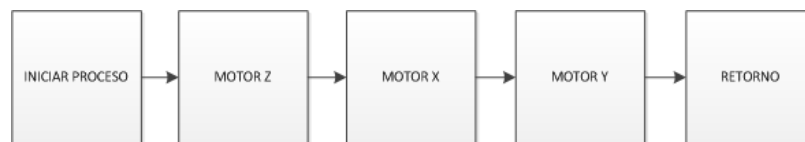


Figura 3.26 Diagrama de bloques del desbastado

En esta etapa, cada motor de cada eje trabaja independientemente para ejecutar movimientos transversales, longitudinales o perpendiculares no simultáneos.

Además es importante conocer que la lógica que gobierna los movimientos del eje Z, dependerán tanto del sentido del movimiento como de la posición en la que se encuentre la herramienta de fresado, dichas ordenes se sintetizan en el diagrama de flujo del proceso, que se muestra en la Figura 3.27.

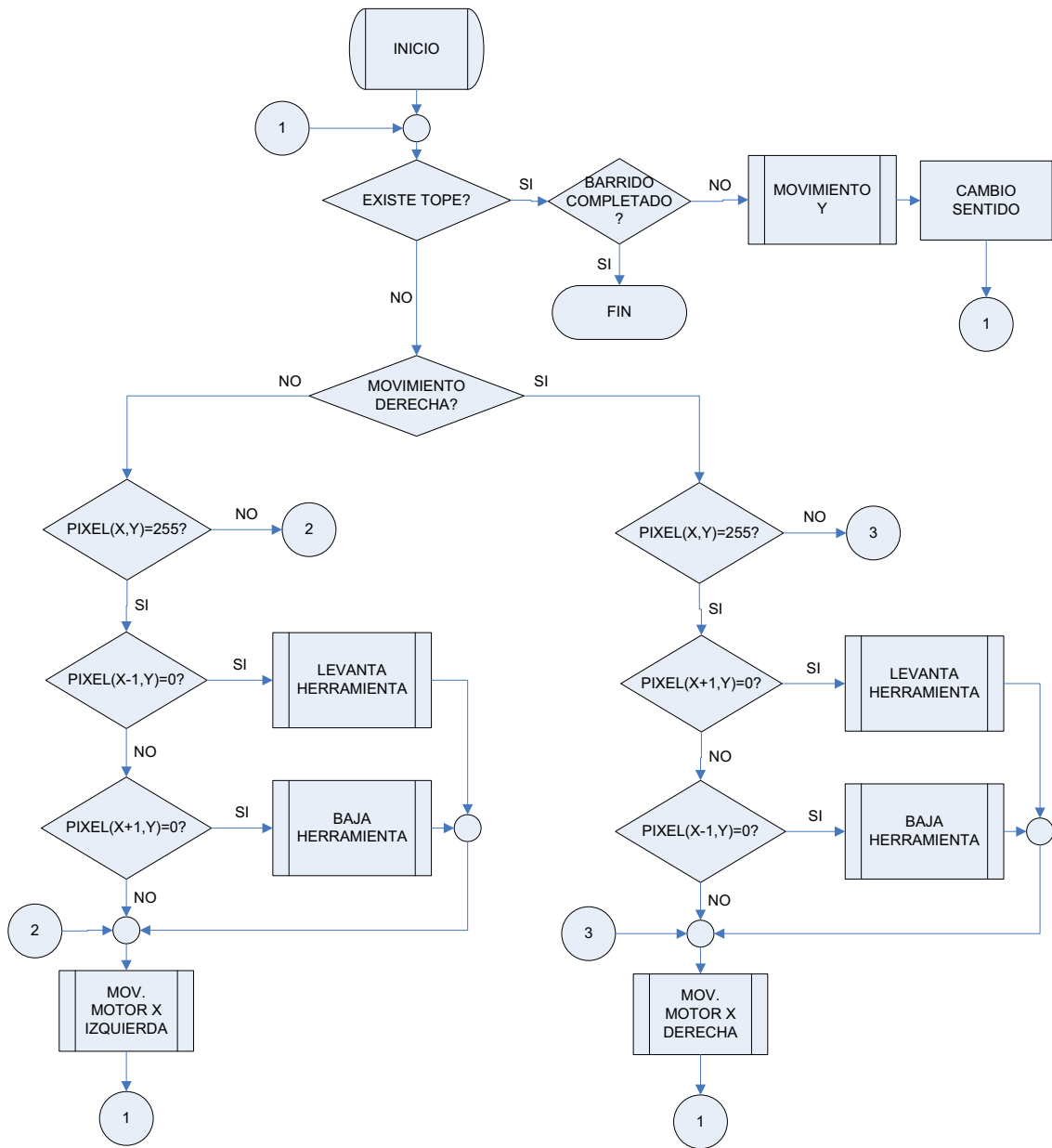


Figura 3.27 Diagrama de flujo del desbastado

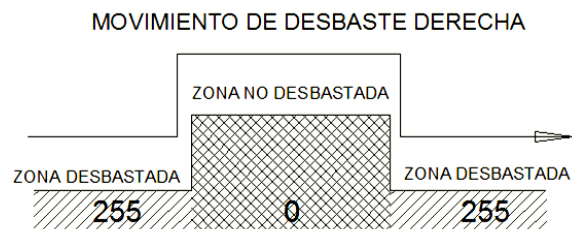


Figura 3.28 Zonas de desbaste y no desbaste movimiento derecha, corte transversal



Figura 3.29 Zonas de desbaste y no desbaste movimiento izquierda, corte transversal

Tabla 3.2 Nomenclaturas del diagrama de flujo desbastado

NOMENCLATURA	SIGNIFICADO
Tope	Cuando la posición de la fresa se encuentra ubicado en un extremo de una fila de la matriz-imagen
Subir herramienta	Cuando el motor Z se gira en sentido horario para subir la posición del eje Z
Bajar herramienta	Cuando el motor Z se gira en sentido antihorario para bajar la posición del eje Z
Mov. Motor X derecha	Cuando el motor X se gira en sentido horario para mover la posición hacia la derecha del eje X
Mov. Motor X izquierda	Cuando el motor X se gira en sentido antihorario para mover la posición hacia la izquierda del eje X
Movimiento Y	Desplazamiento transversal eje Y, para avance de barrido
Barrido Completado	Se ha desbastado cada uno de los puntos de la imagen-matriz y por tanto el proceso de desbastado a concluido

Una vez que ha concluido la etapa de desbastado, la fresa regresa nuevamente a la posición inicial de la matriz para poder continuar con el proceso de perforación.



### 3.1.6 PERFORACIONES

El proceso de perforación se ha considerado como el último proceso, pues requiere un cambio de herramienta, a una de perforación, para lo cual el usuario debe seguir una serie de instrucciones que se despliegan dentro del HMI, como se muestra en la Figura 3.31. Para garantizar la seguridad del operador, a nivel de software se detiene cualquier señal de activación de la herramienta de fresado/taladrado, así como de movimientos involuntarios en cualquiera de los ejes.

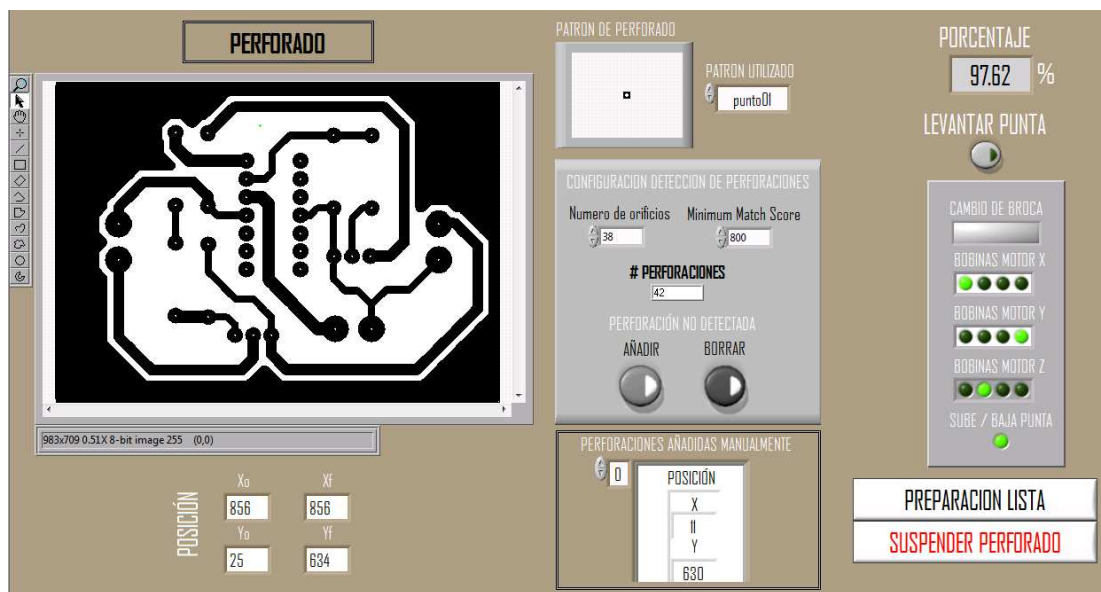


Figura 3.30 Pantalla perforaciones



Figura 3.31 Procedimiento de cambio de herramienta

Al finalizar cualquiera de los procesos anteriores, la fresa será ubicada en la posición 0,0 de referencia, a partir de la cual la herramienta efectuará en primera instancia un movimiento Z de cambio de herramienta, que le permita al usuario con facilidad cumplir dicha tarea, una vez que el cambio de herramienta haya sido realizado, el operario deberá indicar que el procedimiento se ha cumplido y de esta manera la herramienta regresará a su posición Z de trabajo para continuar al proceso de configuración. Cabe recalcar que dicho proceso de cambio de herramienta puede ser re-utilizado en el momento que se lo desee previo a la ejecución del proceso de taladrado.

Una vez ubicada la nueva herramienta de trabajo (broca), se procede a la configuración y disposición de perforaciones, para lo cual se hace uso del bloque IMAQ Find Pattern 2 (Figura 3.32) del Toolkit Vision and Motion, el cual permite identificar patrones, los cuales serán previamente almacenados en una carpeta virtual dentro del proyecto, dichos patrones deben ir acorde al diseño realizado del PCB y almacenados bajo la misma resolución en la subcarpeta PATRONES dentro del proyecto.

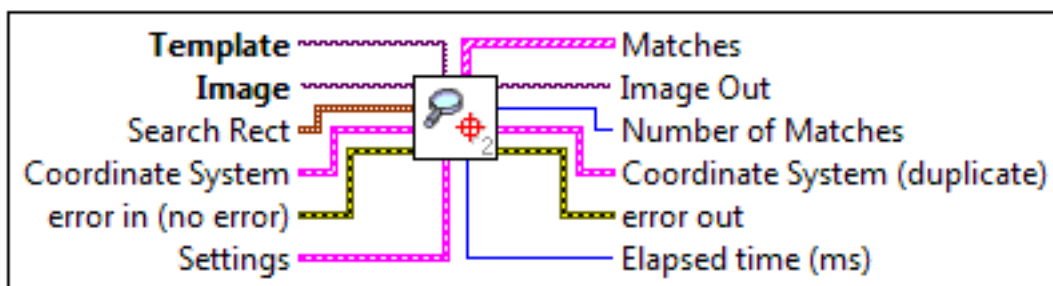


Figura 3.32 IMAQ Find Pattern 2

Este bloque busca dichos patrones en la imagen original, acorde al número de patrones requeridos, así como a la tolerancia definida por el operario en el terminal "Settings". Dichos patrones para esta aplicación vendrían a ser cada una de las formas que se dispone en el diseño del PCB para puntos de suelda, tanto en forma, diámetro de la perforación, como dimensiones de dicho punto. Como recomendación se trabaja con un diámetro de perforación semejante a nivel de diseño del PCB, independiente del tamaño de perforación requerido para reducir el número de patrones presentes en la imagen, pues un cambio de

patrón requeriría un cambio de herramienta, lo cual para su efecto resultaría complicado, es por ello que se trabaja con un único diámetro de perforación, que sería el mínimo diámetro de perforación. Existiendo la posibilidad de repetir el proceso con otro diámetro en caso de requerirlo. Y de esta manera una vez detectados los patrones más comunes, considerando un mismo diámetro de perforación, se procede a ubicar de manera manual, mediante el uso de los controles “Añadir” y “Borrar”, la ubicación de perforaciones no detectadas, así como de perforaciones adicionales que se desee ubicar en el PCB y que no hayan sido definidas previamente en su diseño. Para ello se modifica el bloque Find Pattern 2, creando una entrada adicional donde se aumente las perforaciones no detectadas ubicadas de manera manual y que estas a su vez sean visualizadas en la imagen de detección.

### **3.2 MÁQUINA DE ESTADOS**

La máquina de estados es un patrón de diseño muy común y útil, ya que permite implementar cualquier algoritmo que pueda ser descrito como un diagrama de estado o un diagrama de flujo, donde cada estado puede conducir a uno o varios estados o terminar el flujo del proceso. Generalmente muchas aplicaciones requieren adicionalmente de un estado de inicialización. Más claramente una máquina de estados se define como una máquina de estados finitos, es decir un conjunto de estados y una función de transición. Son conocidas de esta manera la máquina de Mealy y la máquina de Moore [9].

Una máquina de Mealy realiza una acción para cada transición, mientras que una de Moore realiza una acción específica para cada estado en el diagrama de transición de estados. El patrón que en general utiliza LabVIEW para describir una máquina de estados, es una máquina de Moore [9].

Comúnmente las máquinas de estado se usan para crear interfaces de usuario, donde las diferentes acciones del mismo, direccionan hacia diferentes segmentos del proceso que actúan como estados.

En general la infraestructura que se maneja en una máquina de estados dentro de LabVIEW es la siguiente:

- While Loop: Ejecuta continuamente los diferentes estados.
- Estructura Case: Consiste de un caso para cada estado y del código a ejecutar para cada estado.
- Registro de desplazamiento: Contiene la información de transición de estado.
- Código funcional de estado: Implementa la función del estado.
- Código de transición: Determina el siguiente estado en la secuencia.

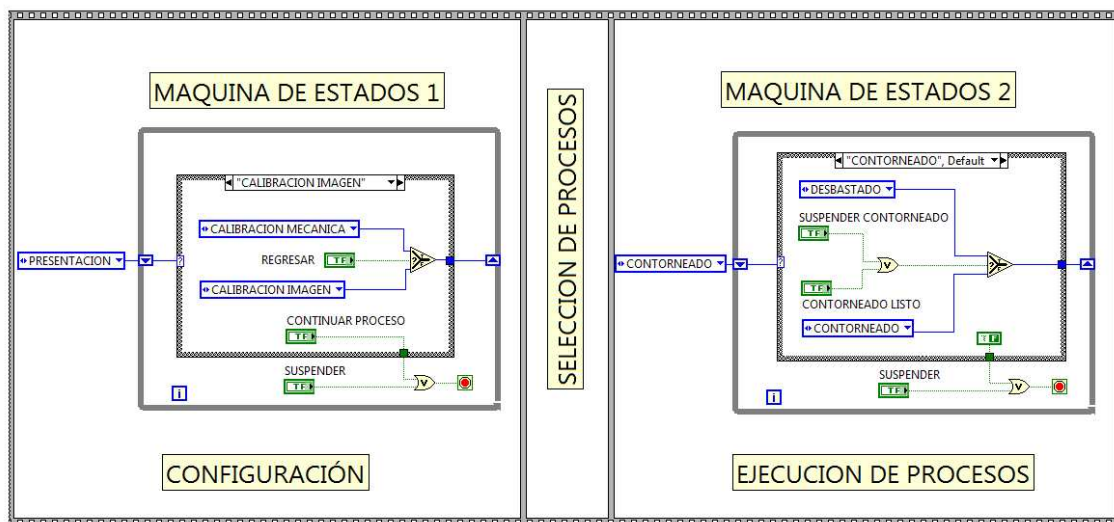


Figura 3.33 Patrón general de programación máquina de estados

De esta manera se maneja el flujo del diagrama de transición de estados mediante una estructura While Loop y un registro de desplazamiento que mantiene el registro del estado actual y lo comunica a la entrada de la estructura Case, donde cada uno de sus casos representan los estados de la máquina de estados.

Una de las maneras como se puede definir y manejar estados es mediante el uso de un control enum, los cuales permiten controlar la inicialización y transición en las máquinas de estados.

Algunas de las condiciones que se deben cumplir en la máquina de estados, son que exista una transición por defecto y que la misma tenga la menor prioridad, así como exista una condición que defina en la interfaz de usuario cual será la siguiente transición.

De acuerdo a la Figura 3.34, los procedimientos generales de la máquina CNC se pueden agrupar en 2 máquinas de estado que permiten un mejor entendimiento de la manera de ejecución, separando por un lado la etapa de configuración y por otro la de ejecución, para brindar un proceso versátil para el usuario y que cumpla con los requerimientos del proceso.

Las etapas de presentación, calibración mecánica y de imagen se agrupan en una máquina de estados, para poseer la interrelación necesaria entre ellos y conseguir de esta manera una etapa de configuración adecuada. Posterior a dicha etapa y una vez seleccionados los procesos a realizarse, se tienen las etapas de ejecución del proceso, en las que se incluyen etapas de contorneado, devastado y perforado dentro de otra máquina de estados.

Al aislar ambas máquinas de estado se garantiza que una vez configurado el proceso este se ejecute totalmente antes de volver nuevamente a la etapa de configuración, pues el proceso una vez iniciado al ser suspendido requeriría una reconfiguración y un cambio de la placa de cobre.

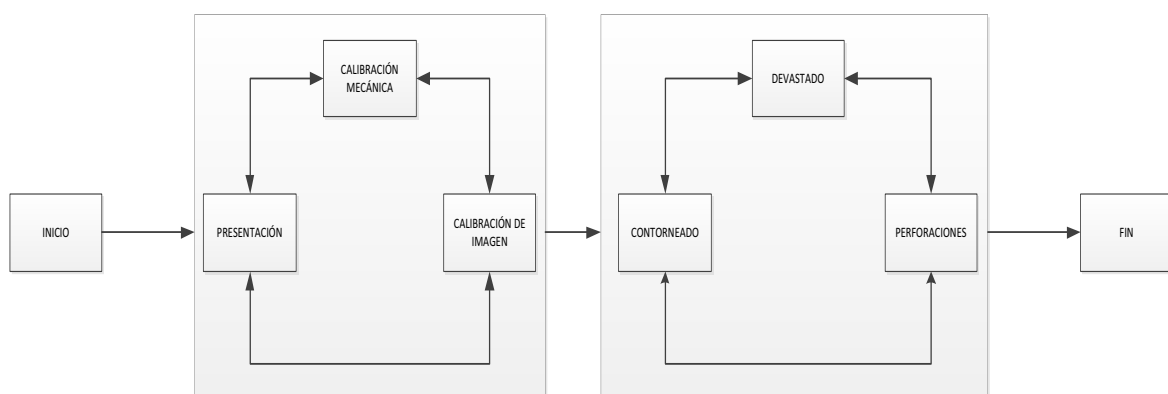


Figura 3.34 Máquina de estados

# **CAPÍTULO 4**

## **PRUEBAS Y RESULTADOS**

Se realiza varias pruebas para comprobar el funcionamiento de la máquina CNC. Partiendo desde el funcionamiento mecánico e instrumentación hasta el resultado obtenido bajo el programa CNC generado por LabVIEW en la elaboración del PCB.

### **4.1 FUNCIONAMIENTO MECÁNICO E INSTRUMENTACIÓN**

Para garantizar un correcto funcionamiento del programa CNC, es indispensable en primera instancia garantizar el correcto funcionamiento mecánico y de la instrumentación correspondiente, es decir parámetros que determinan restricciones y condiciones de la máquina al momento de ejecutar el proceso.

En este caso los parámetros que definen o limitan las operaciones dentro de los procesos son: distancia y correcta maniobra de cierre o corte de interruptores magnéticos dispuestos como fines de carrera en los ejes X, Y y Z; “lagartos de contacto”, que permiten referenciar mediante un contacto eléctrico la herramienta y la placa de cobre a ser trabajada.

Se realizan pruebas para verificar el envío de señales a través de la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6501 a LabVIEW, y se analizan las limitaciones en el área de trabajo considerando las distancias de cierre de los interruptores magnéticos en los fines de carrera que limitan su desplazamiento. Y de manera semejante el adecuado funcionamiento de los “lagartos de contacto”, motores, etc., dentro del mando manual.

#### **4.1.1 SENSORES EN EL EJE X**

Esta prueba se realiza para detectar los límites de trabajo en cuanto a movimientos en el eje X en cada uno de sus extremos. Como los sensores que

están acoplados son sensores magnéticos, las señales de corte responden a una determinada distancia de separación aproximada de 3 cm. En la Figura 4.1 se muestra la posición que determina el extremo izquierdo del eje X y en la Figura 4.2 la posición en el extremo derecho del mismo eje.

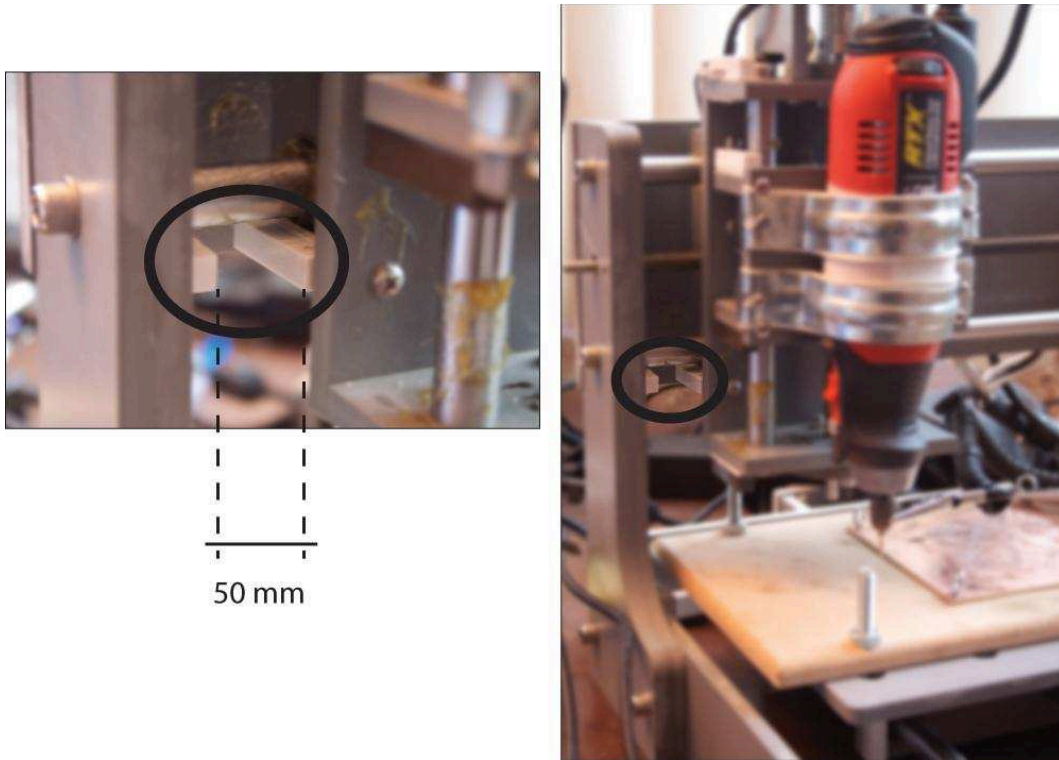


Figura 4.1 Sensor eje X izquierda

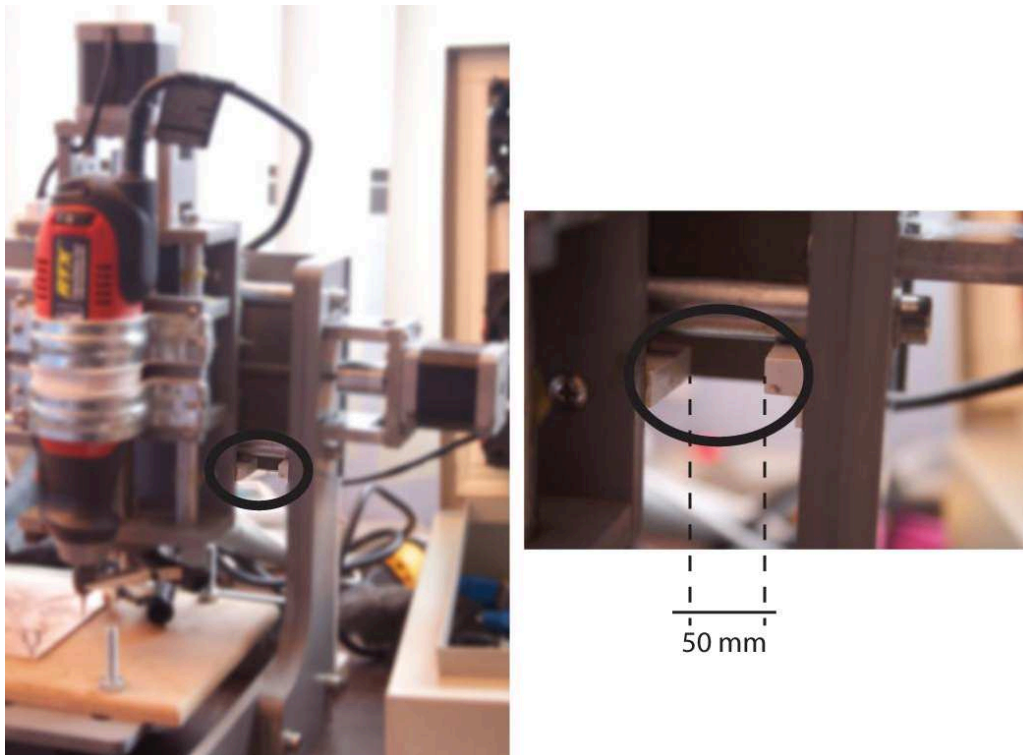


Figura 4.2 Sensor eje X derecha



#### 4.1.2      **SENSORES EN EL EJE Y**

De manera análoga como se realiza en el eje X, se determina el correcto funcionamiento de ambos sensores correspondientes al eje Y, y se verifica que la distancia de cierre de cada uno de los interruptores magnéticos este dentro de los limites, es decir una distancia de separación aproximada de 3 cm. En la Figura 4.3 se muestra la posición que determina el extremo izquierdo del eje X y en la Figura 4.4 la posición en el extremo derecho del mismo eje. Los sensores magnéticos en el eje Y se ubican bajo la mesa de trabajo de la máquina de CNC, como se ve en las Figura 4.3 y Figura 4.4.

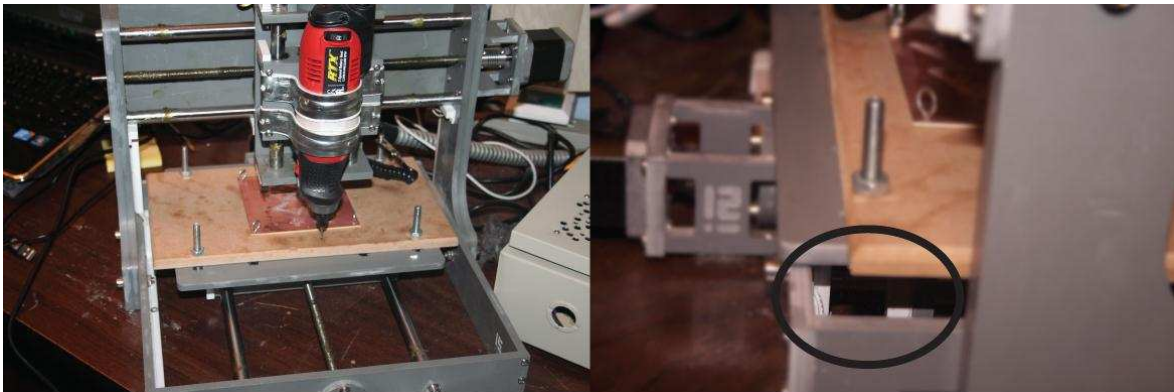


Figura 4.3 Sensor eje Y posterior

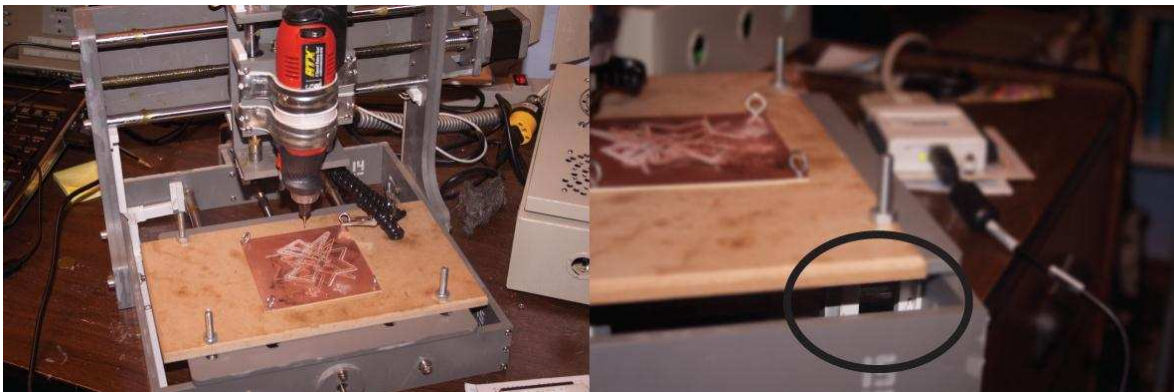


Figura 4.4 Sensor eje Y anterior

#### 4.1.3      **SENSORES EN EL EJE Z**

De manera análoga como se realiza en el eje X y Y, se determina el correcto funcionamiento de ambos sensores correspondientes al eje Z, y se verifica que la distancia de cierre de cada uno de los interruptores magnéticos este dentro



de los límites, es decir una distancia de separación aproximada de 3 cm. En la Figura 4.5 se muestra la posición que determina el extremo superior del eje Z y en la Figura 4.6 la posición en el extremo inferior del mismo eje.

Generalmente el sensor magnético en el eje Z en el extremo inferior no posee funcionalidad dentro del proceso, pues la ubicación de la herramienta impediría en sí, un movimiento que permita su activación, sin embargo en caso de que la herramienta sea removida por razones de mantenimiento o ajuste, es indispensable contar con un fin de carrera que sea el salvaguarde la integridad de dicho eje ante un supuesto sobre desplazamiento.

En el caso que la herramienta se encuentre dispuesta, es indispensable para movimientos de tipo manual o de calibración mecánica mantener los “lagartos de contacto” conectados para evitar un sobre desplazamiento que pueda producir un desajuste de la herramienta o en el peor de los casos una ruptura del acople eje-motor.

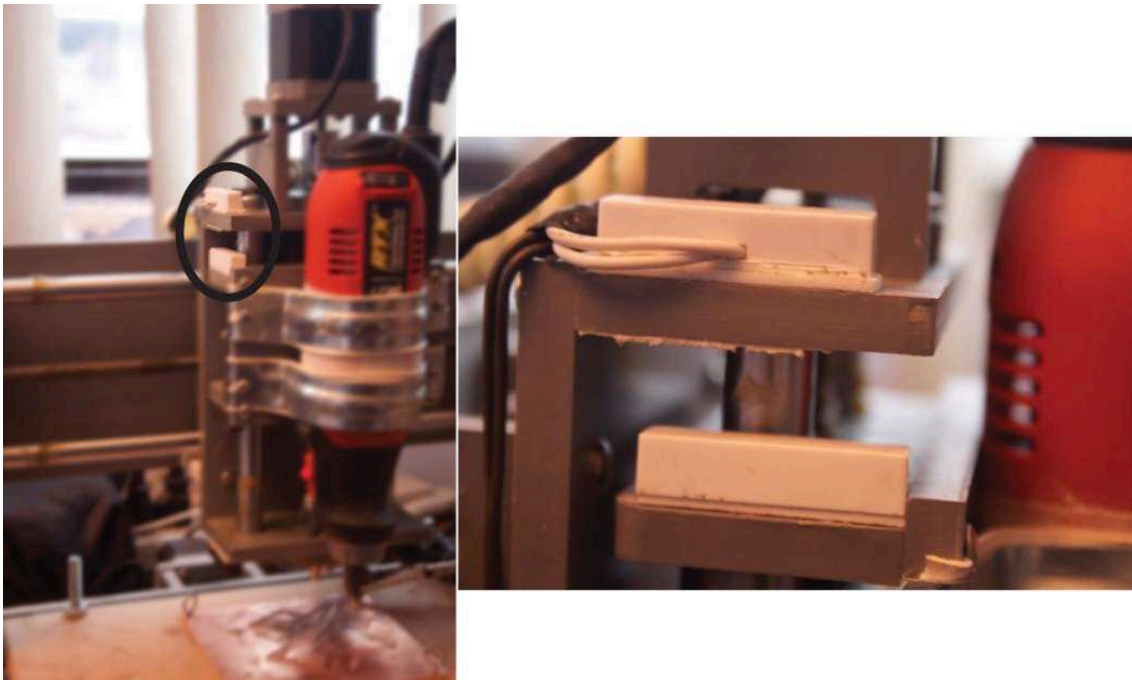


Figura 4.5 Sensor eje Z superior

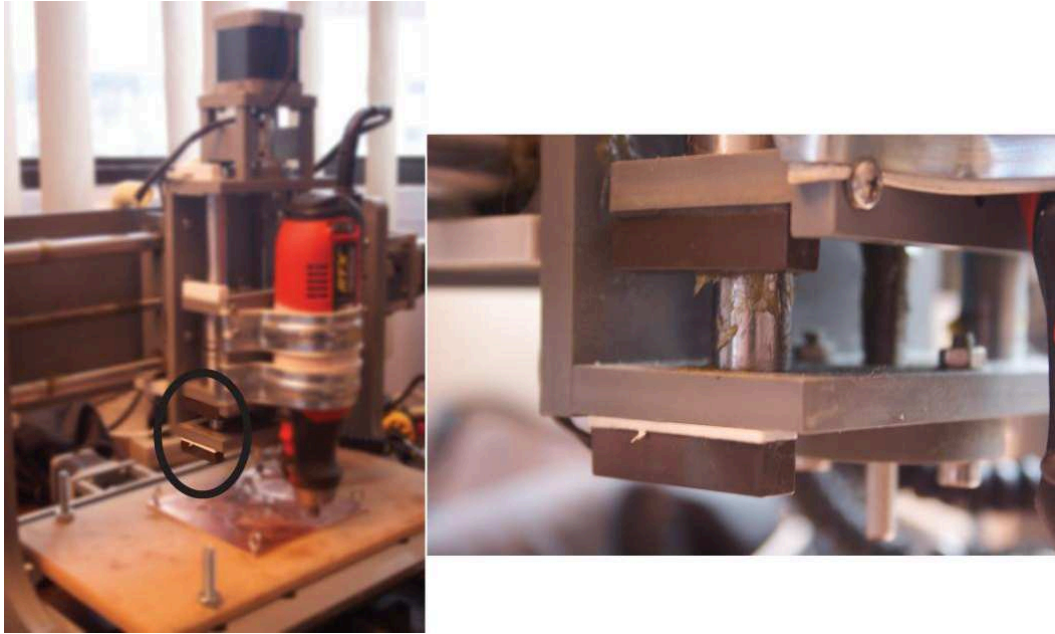


Figura 4.6 Sensor eje Z inferior

#### 4.1.4 FUNCIONAMIENTO “LAGARTOS DE CONTACTO”

Los “Lagartos de Contacto” consisten en 2 pinzas, una en contacto con la placa de cobre (Figura 4.7) y otra con la herramienta de fresado/taladrado (Figura 4.8). El sistema en conjunto cumple dos funciones específicas, primero, salvaguardar el movimiento del eje Z dentro de su límite en el extremo inferior, y segundo, permitir referenciar una altura de contacto que acorde al procedimiento y al tipo de trabajo a realizar funciona como nivel 0 para realizar movimientos de desbaste, de perforación, cambio de herramienta, etc.

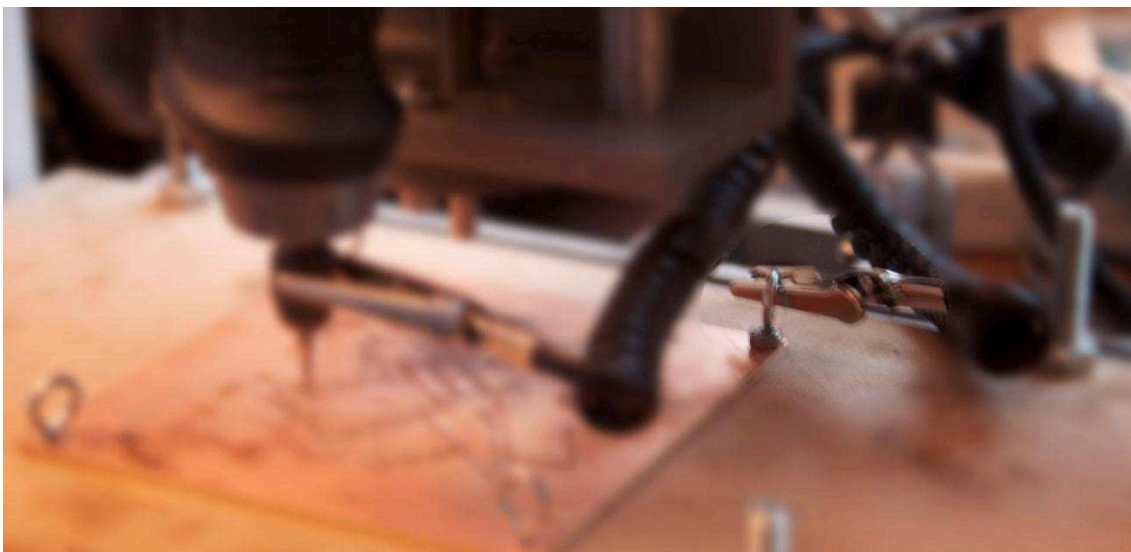


Figura 4.7 Pinza en contacto con la placa



Figura 4.8 Pinza en contacto con la fresa

Uno de los mayores problemas que se presenta cuando se trabaja con máquinas CNC, en trabajos de desbaste o grabado, es el desnivel, sobre todo cuando el desbaste es sumamente pequeño, es por esto, que se debe generar una mesa totalmente perpendicular en cada uno de los puntos de la herramienta de trabajo, y para ello, por medio del mismo dispositivo de taladrado-fresado, se procede a remover parte del material de la mesa (madera) manteniendo la profundidad de desbaste.

Otro de los problemas que se generan al momento de ubicar la placa de cobre, resulta la sujeción de la misma, la cual, además de brindar una inmovilidad de la placa en cualquiera de las direcciones de la mesa, debe ser tal que no produzca deformación o pandeo en la misma, ya que el efecto en el trabajo, sería desbastes de distinta profundidad, y dependiendo de la herramienta, un radio excesivo o deficiente de desbaste, no acorde a las especificaciones.

Para verificar cada uno de los dos problemas mencionados anteriormente, el HMI ofrece la disposición de un contador de pulsos vertical, que será el encargado, de incrementar o decrementar, conforme la herramienta sube o baja, respectivamente, para de esta manera conseguir un nivel de referencia óptimo en la mayor parte de los puntos de la placa de cobre, es decir, verificar que ese nivel de referencia se mantenga constante mediante el valor del contador. Y conseguir de esta manera un nivel de referencia 0 en al menos 4 puntos extremos del área de trabajo.

## **4.2 FUNCIONAMIENTO DE SOFTWARE Y HMI**

Dentro del funcionamiento correcto del software y del HMI se hacen pruebas que garanticen el envío de pulsos adecuado a cada uno de los motores, además de verificar la velocidad de dicho envío, que garantice el correcto funcionamiento, así como condiciones de máximo desplazamiento, y detección de fines de carrera.

### **4.2.1 FUNCIONAMIENTO MANDO MANUAL DESDE JOYSTICK**

Con el joystick se realiza 6 movimientos para controlar los 3 ejes de movimiento de la herramienta. Se puede realizar dentro del mando manual movimientos simultáneos o independientes, para ello se hace uso de las palancas del joystick y de los botones, respectivamente.

Cada uno de los movimientos simultáneos son regidos por la inclinación del joystick, es decir inclinación derecha implica movimiento derecha en el eje X, inclinación izquierda movimiento izquierda en el eje X, inclinación frontal movimiento posterior del eje Y e inclinación hacia atrás, movimiento anterior del eje Y. Adicional a esta palanca el joystick posee una palanca auxiliar que es la encargada de realizar los movimientos superior e inferior en el eje Z.





Figura 4.9 Movimiento derecha eje X



Figura 4.10 Movimiento izquierda X



Figura 4.11 Movimiento posterior eje Y



Figura 4.12 Movimiento anterior Y



Figura 4.13 Movimiento superior eje Z



Figura 4.14 Movimiento inferior eje Z

#### 4.2.2 FUNCIONAMIENTO MANDO MANUAL DESDE EL HMI

Siempre que se trabaje con mando manual, es indispensable poseer adicional a un mando manual físico, un mando desde el HMI, en caso de falla o ausencia del mando antes mencionado, que cumpla al menos con las funciones indispensables. Es por esto que desde el panel frontal elaborado en LabVIEW 2009 (Figura 4.15) se consigue un mando manual virtual, semejante al mando manual físico, de manera que su utilización no requiera un conocimiento adicional para alguien que ha trabajado con el mando manual físico.

A partir de este se puede manejar todos los movimientos de la herramienta de taladrado/fresado en la etapa de calibración mecánica. Y poder conseguir así, como se había dicho posicionamiento de referencia en cada uno de sus ejes.



Figura 4.15 Calibración mecánica panel frontal

Cuando el joystick se encuentra conectado en el computador, el mensaje en el panel frontal indicará "JOYSTICK USB CONECTADO ADECUADAMENTE". Y cuando el joystick no se encuentra conectado al computador, el mensaje en el panel frontal indicará "JOYSTICK USB DESCONECTADO MANEJO CON MANDO MANUAL HMI".

Como se había mencionado previamente, antes de comenzar el proceso es indispensable conseguir un punto de contacto/referencia entre la placa de cobre y la herramienta de fresado/taladrado, pues partiendo de esta referencia se ejecutan los movimientos verticales de desbastado, perforado, cambio de herramienta, etc. Es por ello, que dentro del HMI se impide continuar con el proceso a menos que, se haya cumplido con las condiciones de contacto con la placa y posición (0,0) de trabajo.

Por lo cual, en caso de que el usuario, olvidara dichas restricciones, al momento que pretenda pasar a la etapa siguiente del proceso se indicara inmediatamente mediante un mensaje sobre dicha restricción, tal como se indica: "RECUERDE QUE PARA CONTINUAR EL PROCESO, DEBE UBICAR LA HERRAMIENTA CON LOS RESPECTIVOS LAGARTOS DE CALIBRACIÓN EN POSICIÓN (0;0) Y EN CONTACTO CON LA PLACA" (Figura 4.16).

Una vez que se cumple con la restricción de contacto con la placa y posición (0,0), la señal es procesada y visualizada en el HMI, por lo cual, bajo la misma petición, el mensaje ahora será: "DESCONECTE CABLES DE CONTACTO ANTES DE CONTINUAR" (Figura 4.17). Dicho mensaje permanecerá visualizado a manera de paro de programa, hasta que se cumpla dicha petición, pues el lagarto en los siguientes procesos no podrá estar conectado debido a ser un punto de rotación de la herramienta al ser encendida.



Figura 4.16 Sensor de contacto no conectado





Figura 4.17 Sensor de contacto conectado

#### 4.2.3 PROCESAMIENTO ADECUADO DE IMAGEN

Al momento de importar la imagen a LabVIEW a partir de un software de diseño de PCB, es indispensable, además del formato de dicha imagen, considerar una correcta resolución que garantice formas definidas y curvas totalmente continuas, evitando efectos de pixelado y pérdida de formas simples. Dentro de los formatos de imagen más utilizados, se considera al formato .jpg y .png como apropiados para el propósito. Siendo estos formatos validos de exportación dentro del programa PROTEUS ARES 7 PROFESSIONAL.

Las imágenes se exportan de acuerdo a la calidad definida por el usuario, sin embargo, acorde a dicha calidad se consideran, los pulsos/pixel correspondientes, que relacionan la medida real de la placa, con la resolución de la misma, la cual generalmente viene expresada en DPI, que representa la densidad de pixeles por pulgada (density per inch) que existe en una imagen. Dependiendo de la resolución elegida se tendrá imágenes más o menos pixeladas, y márgenes de error acorde a las relaciones que se hagan con la medida real de la PCB a ser realizada, acorde a las limitaciones mecánicas de la máquina CNC, y longitudes de paso del tornillo sin fin.

Como bien se sabe, los motores paso a paso vienen definidos por un ángulo de giro por pulso, el cual define en sí, el número de pulsos necesarios para generar una revolución de motor. Es por ello que acorde a las especificaciones de los motores paso a paso de la máquina CNC en cada uno de sus ejes, se genera 200 pulsos para conseguir una revolución de motor. La cual para su efecto equivale a un paso del tornillo sin fin, pues el tipo de acople motor-eje, es un acople directo, teniéndose así, con 200 pulsos de motor, un desplazamiento lineal del carro de 0.125 cm, y de esta manera se necesitaría de 1600 pulsos/cm o 62992 pulsos/100 pulgadas aproximadamente.

De la Figura 4.18 a la Figura 4.22 se observan imágenes para distintas resoluciones, y el efecto que produce, tener imágenes de baja resolución, como pérdida de formas simples y pixelamiento de la imagen.



Figura 4.18 Imagen con resolución de 100 DPI



Figura 4.19 Imagen con resolución de 200 DPI



Figura 4.20 Imagen con resolución de 300 DPI



Figura 4.21 Imagen con resolución de 400 DPI



Figura 4.22 Imagen con resolución de 600 DPI

Como se observa en las imágenes anteriores, la calidad de 100 DPI se encuentra demasiado borrosa, y formas simples como el orificio prácticamente han sido perdidas bajo esta resolución, lo cual crearía inconvenientes en la etapa de perforación. Por lo tanto, mientras mayor es la calidad de la imagen, mayor precisión existirá tanto en el trabajo de contorneado y desbastado, y se tendrán formas más definidas que permitan una mejor detección de perforaciones en la etapa de perforado.

A continuación se presenta la Tabla 4.1, la cual es una tabla comparativa para las distintas resoluciones, y el porcentaje de exactitud para cada una, despreciando el error generado por desgaste de la herramienta de fresado/perforado.

Tabla 4.1 Error en instrucción y porcentaje de exactitud

RESOLUCIÓN		Avance	Instrucción	Instrucción Real*	Error en Instrucción	
DPI	Pixel/cm	Pulsos/cm	Pulsos/pixel	Pulsos/pixel	Pulsos/pixel	cm falla/pixel
100	39.37	1600	40.64	40	0.64	0.00040
200	78.74	1600	20.32	20	0.32	0.00020
300	118.11	1600	13.55	13	0.55	0.00034
400	157.48	1600	10.16	10	0.16	0.00010
600	236.22	1600	6.77	6	0.77	0.00048

Longitud PCB [cm]	Exactitud (%)					Longitud PCB Real** [cm]
	100DPI	200DPI	300DPI	400DPI	600DPI	
1	99.96	99.98	99.97	99.99	99.95	0.9999
2	99.96	99.98	99.97	99.99	99.95	1.9998
3	99.96	99.98	99.97	99.99	99.95	2.9997
4	99.96	99.98	99.97	99.99	99.95	3.9996
5	99.96	99.98	99.97	99.99	99.95	4.9995
6	99.96	99.98	99.97	99.99	99.95	5.9994
7	99.96	99.98	99.97	99.99	99.95	6.9993
8	99.96	99.98	99.97	99.99	99.95	7.9992
9	99.96	99.98	99.97	99.99	99.95	8.9991

10	99.96	99.98	99.97	99.99	99.95	9.9990
<p>*Debido a que el número de pulsos, es un número entero, se debe redondear el valor de la instrucción calculada a un valor próximo. Generándose por tanto un error en instrucción.</p> <p>**Longitud obtenida con la resolución más alta que brinda mayor exactitud (400DPI)</p>						

A pesar que 600 DPI es la mejor resolución y parecería ser la mejor opción, las pruebas demuestran que genera un error de aproximadamente 0.5mm por cada 10cm de longitud, lo cual para efectos de pines de elementos resultaría totalmente inadecuado, es por esto que se elige la resolución de 400 DPI ya que genera el menor error. Pues es la que además de ofrecernos una claridad adecuada, casi sin efectos de pixelado o pérdida de formas, ofrece una mayor exactitud al momento de efectuar el trabajo.

### **4.3 PRUEBAS DE REALIZACIÓN COMPLETA**

Las pruebas de realización completa pretenden determinar problemas mecánicos así como de control, y la interrelación adecuada entre ambos, es decir respuesta mecánica frente a una o más acciones de control, además de determinar herramientas adecuadas para el trabajo, que generen el mejor acabado y produzcan el menor desgaste en zonas de no desbaste.

#### **4.3.1 PRUEBA DE RESPUESTA MECÁNICA FRENTE A ACCIÓN DE CONTROL**

Una de las limitaciones que presentan los motores paso a paso es su velocidad, ya que los tiempos de activación y descarga de sus bobinas en cada uno de sus pulsos, deben efectuarse y concluirse para producir el siguiente paso o pulso, es así que, generar una secuencia demasiado rápida en la acción de control podría significar pérdida de posicionamiento y un trabajo no uniforme.

En primera instancia para conseguir la mayor velocidad posible, se debe trabajar a nivel de hardware con elementos de acción rápida, tanto en el sistema de acoplamiento como en los controladores de los motores paso a paso, de esta manera, la única variable que limitaría su velocidad, es su propia

construcción física. Así, a nivel de software se consigue su máximo rendimiento, variando únicamente la velocidad de envío de la secuencia, con un control temporizado de lazo hasta conseguir el menor tiempo, es decir la mayor velocidad de envío de la secuencia, que no genere pérdida de posicionamiento o pulsos, y por tanto un trabajo uniforme.

Las pruebas de respuesta mecánica frente a una acción de control, demuestran que la velocidad máxima de envío de la secuencia que se puede configurar desde el HMI, es decir el menor tiempo que debe existir entre pulsos, es de 7 milisegundos, tiempo con el cual no existe pérdida de pulsos, una adecuada respuesta mecánica y por tanto, no existe pérdida de ubicación de la herramienta.

Cuando el tiempo de envío de la secuencia de pulsos es menor a 7 milisegundos/pulso, se pierden pulsos por respuesta mecánica lenta de manera aleatoria, en uno u otro sentido de movimiento, lo cual produce una imagen no simétrica y una pérdida de posicionamiento de la herramienta, principalmente por falta de respuesta mecánica.

Como muestra la Figura 4.23, en un proceso de desbastado de un rectángulo, gran cantidad de pulsos, cuando la herramienta mantenía movimiento izquierda, se pierden, mientras que en sentido derecha los pulsos aparentemente fueron enviados adecuadamente, lo cual hizo que la imagen rectangular adquiriera una forma inclinada e irregular.

De manera equivalente como se muestra en la Figura 4.24 con una velocidad de envío de secuencia mayor o igual a 7 milisegundos/pulso la imagen rectangular muestra total simetría y ortogonalidad en sus movimientos derecha/izquierda y viceversa, y por tanto ninguna pérdida de posicionamiento o pulsos.

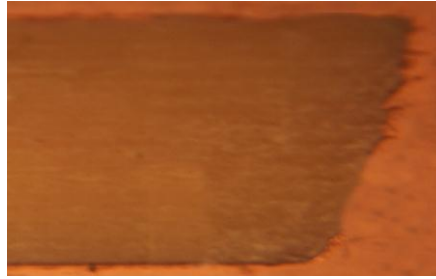


Figura 4.23 Error por pérdida de pulsos en proceso de desbastado ortogonal



Figura 4.24 Envío de pulsos adecuado en proceso de desbastado ortogonal

#### **4.3.2 SELECCIÓN DE HERRAMIENTA DE DESBASTADO (FRESAS)**

Uno de los principales problemas en este proyecto es la selección del tipo de fresa por dos motivos esenciales: primero, el alto desgaste que sufre una herramienta de un material inadecuado para el trabajo, y segundo, la falta de precisión y mal acabado debido a la forma y material de la misma.

Como se ha mencionado en el Capítulo 1, parámetros como el diámetro efectivo y la altura de vértice, son determinados por el tipo de fresa a utilizar, es decir, si es de tipo cono o cilíndrica, o si tiene la cabeza redondeada o no.

Dependiendo del tipo de fresa se tendrá, por ejemplo si se utiliza una fresa cónica (Figura 4.25) un trabajo de más precisión pero con un acabado menos pulido (Figura 4.26), o si se utiliza una fresa con cabeza redondeada con mayor diámetro efectivo (Figura 4.27) un trabajo de menor precisión, pero mejor acabado y pulido (Figura 4.28).



Figura 4.25 Procedimiento de contorneado con fresa cónica

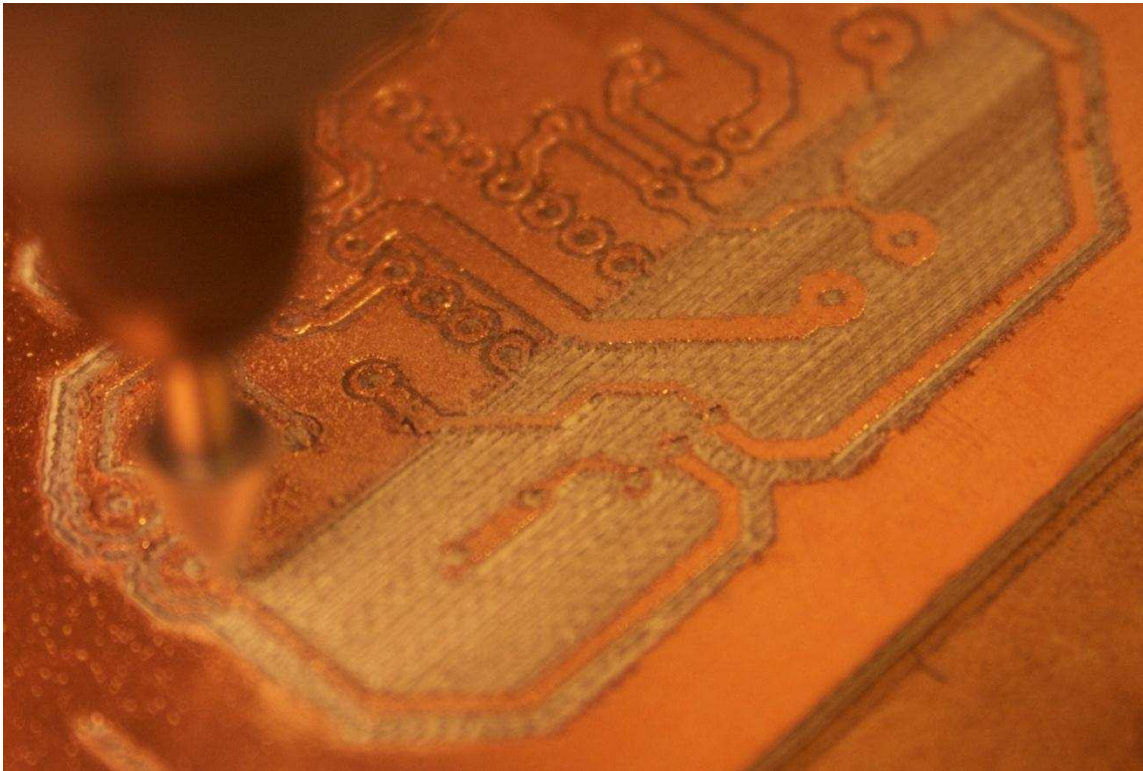


Figura 4.26 Procedimiento de desbastado con fresa cónica



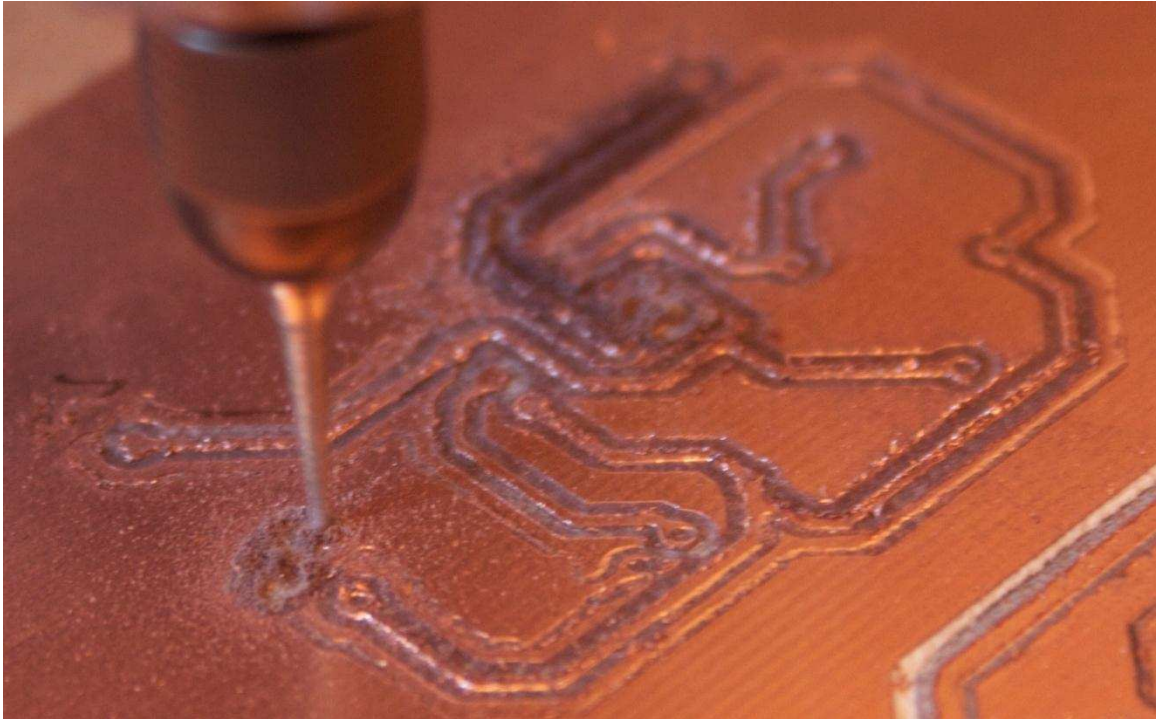


Figura 4.27 Procedimiento de contorneado fresa cónica punta redondeada

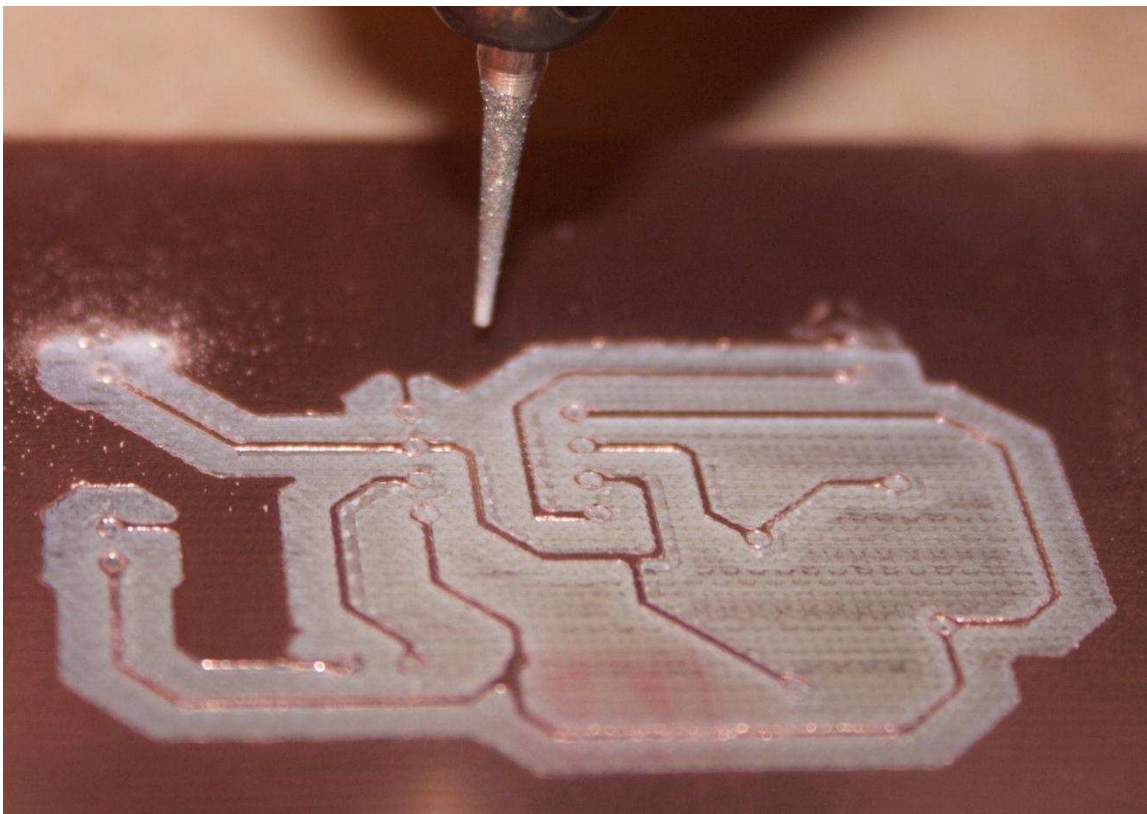


Figura 4.28 Procedimiento de desbastado fresa cónica punta redondeada



Es decir un menor diámetro efectivo significa una mayor precisión, pero una mayor altura de vértice, y por tanto, un acabado de menor calidad. Y una de diámetro efectivo mayor resultaría en una menor precisión, pues eliminaría zonas de no desbaste por efecto mismo de sus dimensiones, sin embargo generaría una altura de vértice mínima, y un pulido excelente de las zonas de desbaste.

Uno de los parámetros que influye en la precisión del trabajo es la altura de perforación, pues generalmente las fresas poseen formas cónicas, y por tanto su diámetro efectivo está directamente relacionado con la profundidad de perforación, es por eso que se considera uno de los mayores problemas al realizar este tipo de trabajo (Figura 4.29 y Figura 4.30), corregir totalmente cualquier desnivel que existiera, caso contrario se presentarían en la placa diversos diámetros efectivos y en ciertos casos, éste podría ser o demasiado excesivo o bien demasiado superficial.

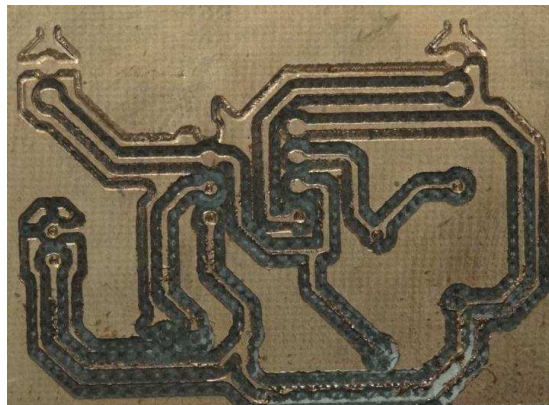


Figura 4.29 Proceso suspendido por falla de desnivel

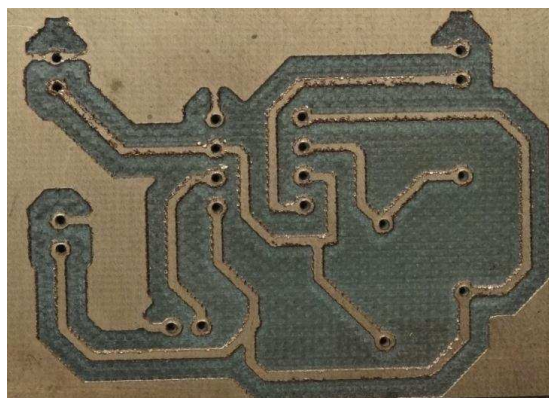


Figura 4.30 Proceso finalizado con corrección de desnivel

### 4.3.3 SELECCIÓN DE BROCAS PARA LAS PERFORACIONES

Para la etapa de perforación, es indispensable seleccionar una broca, además de resistente, de un diámetro acorde a las perforaciones, en general se recomienda realizar todas las perforaciones en un solo proceso, por lo cual el diámetro de la broca deberá ser el mínimo que se requiera en el PCB, para evitar la pérdida de contacto de cobre en puntos de suelda (Figura 4.31 y Figura 4.32).

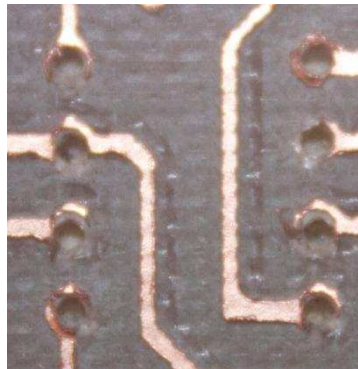


Figura 4.31 Problema al utilizar broca grande



Figura 4.32 Perforaciones con broca de menor diámetro

### 4.3.4 RESULTADOS REALIZACIÓN COMPLETA

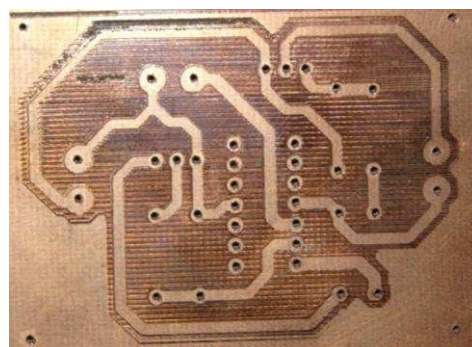


Figura 4.33 PCB con desbastado superficial

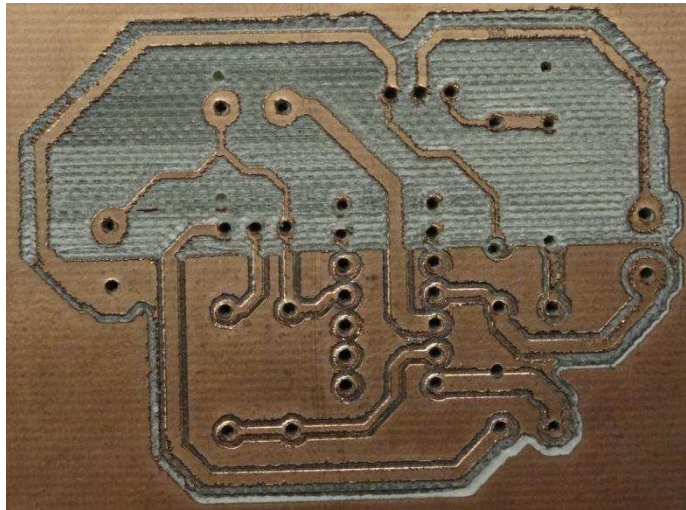


Figura 4.34 PCB con fresa cónica, broca gruesa, desbastado 50%

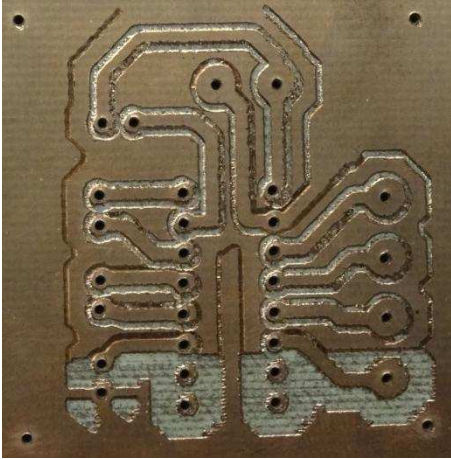


Figura 4.35 PCB con fresa cónica, broca fina, desbastado 20%

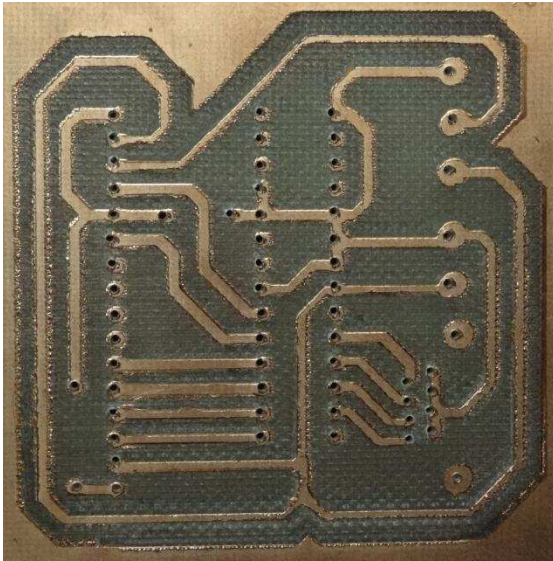


Figura 4.36 PCB con fresa cónica, desbastado 100%, broca fina



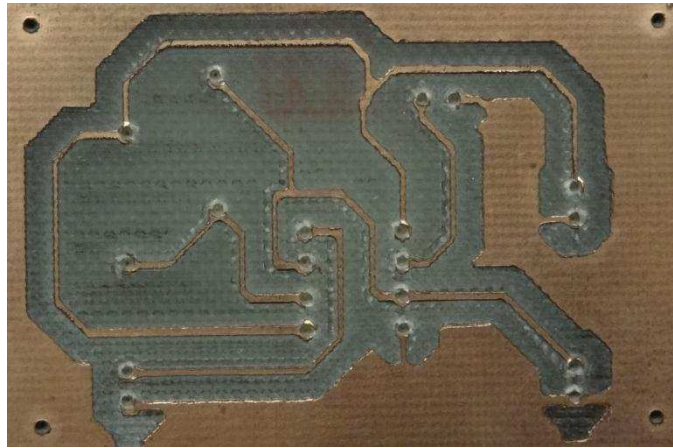


Figura 4.37 PCB con fresa cónica cabeza redondeada, desbastado 100%, broca gruesa

#### 4.4 LISTADO DE ELEMENTOS Y COSTOS

Tabla 4.2 Costos de los elementos para tarjeta de control

Elemento	Unidad	Valor unitario	Costo
Resistencia 330Ω 1/4 W	13	0,02	0,26
Resistencia 120Ω 1/4 W	1	0,02	0,02
Optotransistor 4N25	13	0,5	6,5
Schmith Trigger 74LS14	4	0,7	2,8
Diodo 1N4007	5	0,1	0,5
Capacitor electrolítico 2200μF 16V	3	0,7	2,1
Regulador de voltaje 7805	1	0,5	0,5
Regulador de voltaje 7812	1	0,5	0,5
Transistor TIP122	1	0,6	0,6
Relé 5V	1	0,8	0,8
RJ45 montaje placa	5	0,45	2,25
DV25 macho montaje placa	1	0,45	0,45
Bornera 2 líneas	3	0,3	0,9
Conector 2 líneas	1	0,35	0,35
Conector 3 líneas	1	0,39	0,39
Sócalo 14 pines	4	0,2	0,8
Sócalo 6 pines	13	0,2	2,6
transformador 1.5 A	1	5	5
Tarjeta circuito impreso 20x10 cm	1	2,31	2,31
Papel termotransferibre	1	1	1
Cloruro férrico	2	0,3	0,6
<b>Subtotal</b>			<b>31,23</b>

Tabla 4.3 Costo de elementos para la fuente de control

Elemento	Unidad	Valor unitario	Costo
Puente de diodo 4A	1	3	3
Regulador de voltaje 7805	1	0,5	0,5
Transistor 2N3055	1	1,65	1,65
Disipador	1	0,81	0,81
Portafusible	1	0,8	0,8
fusible 4 A	1	0,06	0,06
Transformador 4A	1	12,5	12,5
Capacitor electrolítico 3300 $\mu$ F 50 V	1	0,7	0,7
Capacitor electrolítico 2200 $\mu$ F 35 V	1	0,7	0,7
resistencia 330 $\Omega$ 1/4 W	1	0,02	0,02
bornera 2 líneas	3	0,3	0,9
conector 2 líneas	2	0,35	0,7
diodo led	1	0,1	0,1
Relé 5 V	1	0,8	0,8
Tarjeta circuito impreso 10x10 cm	1	0,91	0,91
Papel termotransferible	1	1	1
Acido	2	0,3	0,6
<b>Subtotal</b>			<b>25,75</b>

Tabla 4.4 Costo de elementos para adquisición de datos

Elemento	Unidad	Valor unitario	Costo
NI USB-6501	1	147,84	147,84
Cable Paralelo	1	2,5	2,5
Tarjeta circuito impreso 20x10 cm	1	2,31	2,31
Papel termotransferible	1	1	1
Ácido	2	0,3	0,6
<b>Subtotal</b>			<b>154,25</b>

Tabla 4.5 Costo de elementos realizado para el proyecto

Elemento	Unidad	Valor unitario	Costo
Ventilador	3	2	6
Joystick			15
Máquina CNC			340
Fresas			5
Taladro			30
Tablero			20,15
Cables, conectores, rieles, regletas			25
Envío			129,8
<b>Subtotal</b>			<b>570,95</b>

Para la construcción del proyecto se trabajó entre 5 a 6 horas diarias durante 4 meses. Si se considera un sueldo de 500 dólares mensuales por persona, el costo de trabajo es de 4000 dólares.

Sumando los valores de los elementos y la ingeniería se tiene:

Tabla 4.6 Costo total del proyecto

Descripción	Precio Total
Costo de Materiales y Elementos	\$ 782,18
Costo de Ingeniería	\$ 4.000,00
Costo Total	\$ 4.782,18

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se presentan las diferentes conclusiones y recomendaciones que se han obtenido en el desarrollo del proyecto de titulación.

### 5.1 CONCLUSIONES

- Elaborar un HMI significa crear una interfaz amigable y de fácil entendimiento para cualquier usuario, brindando además de los controles necesarios para su manejo y utilización, seguridad al usuario en cada uno de sus procesos, impidiendo el uso accidental de elementos que puedan atentar contra la integridad del operario, así como creando alertas que permitan a un operario controlar y monitorear el procedimiento de la manera más eficiente.
- El uso de elementos de protección y maniobra adecuados, es siempre indispensable en sistemas que presenten uso de cargas inductivas o de alto consumo, sin embargo se concluye que no solo la disposición de este tipo de elementos es necesaria, sino también la coordinación adecuada de cada uno de ellos. Es por esto, por ejemplo, que siempre se debe asegurar el no funcionamiento de circuitos de potencia bajo la ausencia de circuitos de control, y en caso de sobrecargas, limitar su funcionamiento o proteger individual y colectivamente cada elemento del sistema.
- Cuando se trabaja con sistemas delicados de adquisición, es indispensable disponer de un sistema de acoplamiento, que salvaguarde dicho dispositivo, pues aislar circuitos de control y potencia es una práctica que, además de ser siempre recomendable, puede brindar resultados favorables como son inmunidad al ruido y mayor estabilidad de las señales.

- No siempre un sistema de control en lazo cerrado es un sistema óptimo para todas las aplicaciones, mayor complejidad no significa mayor eficiencia, un sistema de lazo cerrado debe aplicarse bajo un propósito y una necesidad, pues como bien se ha visto una fresadora CNC cuyo torque de arrastre es mínimo para el trabajo a realizar, funciona de manera óptima con un sistema de control en lazo abierto, siendo económica y técnicamente favorable.
- Cuando se elabora una máquina CNC es indispensable conocer el tipo de trabajo a realizar, conocer las limitaciones del sistema mecánico, y coordinar una adecuada respuesta mecánica frente a una acción de control, pues pérdida de instrucciones en un CNC representa pérdida total del trabajo a realizar.
- Elaborar un programa de control de forma modular, y mediante secuencias que garanticen la correcta interrelación entre cada uno de sus procesos o estados, permite una depuración de errores y facilidad de crear características más amigables al operador, como es movilidad entre los diferentes procedimientos de configuración mediante máquinas de estado, es decir presentación de botones que muevan el proceso entre sus diferentes etapas, y asegurar además que procesos secuenciales no puedan ser detenidos de manera tempestiva, y en caso de serlo, garanticen en primer lugar la integridad del operario.
- Acorde a las pruebas y resultados obtenidos, se concluye que la máquina basada en control numérico computarizado se ha diseñado y construido con las especificaciones propuestas y garantiza una elaboración de PCB que cumple con los requerimientos básicos.
- Después de posicionar elementos electrónicos en PCB elaborados con el sistema CNC y realizar las mediciones respectivas, se concluye que el sistema ofrece las características de precisión y exactitud propuestas en el proyecto realizado obteniendo resultados con un error menor al 5%.



## 5.2 RECOMENDACIONES

- Cuando se utiliza sistemas cuyo control se realiza exclusivamente mediante computador, se recomienda trabajar con un computador “dedicado”, es decir, exclusivo para la aplicación.
- Siempre que se trabaje con sistemas CNC de fresado, se recomienda considerar la velocidad de la herramienta acorde a la velocidad de arrastre que se pretende disponer, pues trabajar con una velocidad de la herramienta inferior podría provocar desgaste excesivo en la fresa o sobrecalentamiento de la misma.
- Si se realiza trabajos de alta precisión como en este caso elaboración de PCB, se recomienda seleccionar una fresa rígida, preferentemente de alta velocidad y con un diámetro pequeño para ganar precisión en las pistas realizadas en el circuito impreso.
- En cuanto al desnivel de la mesa de trabajo, se recomienda verificar una mesa totalmente perpendicular a la herramienta, que garantice que la pieza a realizar correctamente sujeta, siempre mantenga un mismo nivel, para lo cual una de las alternativas es elaborar la mesa de trabajo en un material de fácil desbaste con la misma herramienta, creando un nivel inferior manteniendo la herramienta de trabajo fija.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cultura S.A., *“Manual de Mecánica Industria – Máquinas y Control Numérico.”* Cultural S.A., Madrid, España, 2002.
- [2] Jaime. Vargas, *“Producción por Virutaje. Fundamentos y Componentes de las Máquinas Herramientas.”* EPN, Quito, Ecuador, 2005.
- [3] Slide Share, Fresadora, 2010,  
<http://www.slideshare.net/nurrego/fresado>.
- [4] Dormer Tools, Fresado, 2009,  
[http://www.dormertools.com/sandvik/2531/Internet/Spanish/s004464.nsf/Alldocs/Product\\*2DMachiningSolutions\\*2DPDF\\*2ATH\\*2DPDFes/\\$file/8Fresado.pdf](http://www.dormertools.com/sandvik/2531/Internet/Spanish/s004464.nsf/Alldocs/Product*2DMachiningSolutions*2DPDF*2ATH*2DPDFes/$file/8Fresado.pdf)
- [5] Rincón del Vago, Fresadoras, 2011,  
[http://html.rincondelvago.com/fresadoras\\_1.html](http://html.rincondelvago.com/fresadoras_1.html)
- [6] National Instrument, NI USB-6501, 2011,  
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/201630>
- [7] National Instrument, Stepper Motor, 2011,  
<http://sine.ni.com/nips/cds/print/p/lang/en/nid/203936>
- [8] Todo Robot, Motor a Pasos, 2005,  
<http://www.todorobot.com.ar/informacion/tutorial%20stepper/stepper-tutorial.htm>
- [9] National Instrument, *“LabVIEW Basics”* NI, Texas, USA, 2009.
- [10] Electrónica Fácil, Funcionamiento del Diodo, 2004,  
<http://www.electronicafacil.net/tutoriales/Funcionamiento-del-diodo.php>
- [11] Datasheet Archive, Datasheet & Application Database, 2012,  
<http://www.datasheetarchive.com/>

