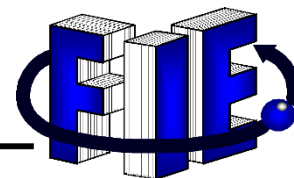




UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

REACONDICIONAMIENTO DE MÁQUINA CNC DE
3 EJES

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA

Presenta:

ROBERTO CARLOS CHÁVEZ TINOCO

Asesor de tesis:

Maestro en ciencias en Ingeniería Electrónica

ISRAEL LUNA REYES

MORELIA MICHOACÁN, MARZO 2021

Agradecimientos

Para mis padres y hermanos ya que con su apoyo tanto económicamente como emocionalmente fue posible llegar a esta etapa de mi vida y principalmente a mi madre y hermana las cuales a pesar de problemas nunca dejaron de apoyarme para el término de la carrera.

A mis amigos de infancia los cuales influyeron para no dejar de estudiar.

A mis amigos y compañeros de clase ya que gracias a los momentos de diversión hicieron posible una buena estadía en la facultad durante la carrera.

A mis maestros ya que cada uno de ellos hicieron que tuviera perspectivas diferentes, pero siempre con un mismo fin.

A mi maestro y asesor de tesis por el apoyo, paciencia, dedicación, aprendizaje y consejos que tuvo hacia mí los cuales fueron relevantes para el término de este trabajo.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado principalmente a mi madre y hermana las cuales fueron un impulso para concluir esta carrera.

INDICE

Agradecimientos.....	2
Dedicatoria	3
Resumen	6
Palabras Clave	6
Abstract	7
Keywords.....	7
Lista de figuras.....	8
Lista de tablas	10
Capítulo 1 Introducción.....	11
1.1 Introducción	11
1.2 Antecedentes	11
1.3 Justificación	13
1.4 Objetivos	13
1.4.1 Objetivo general.....	13
1.4.2 Objetivos específicos	13
1.5 Metodología	14
Capítulo 2 Marco teórico	15
2.1 Introducción	15
2.2 Principio de funcionamiento	15
2.2.1 Control de movimiento	17
2.2.2 Accesorios programables	20
2.2.3 Programa CNC	21
2.2.4 Controlador CNC.....	24
2.2.5 Programa CAM.....	25
2.2.6 Sistema DNC	26
2.3 Máquinas CNC más comunes y clasificación de controles numéricos	27
Capítulo 3 Hardware CNC disponible y diseñado.....	38
3.1 Hardware reutilizado	38
3.1.1 Hardware de movimiento.....	38
3.1.2 Hardware de control	39

3.1.3 Hardware de límite	45
3.2 Hardware adicional	47
Capítulo 4 Software utilizado	54
4.1 Software del controlador	54
4.2 software de la máquina CNC.....	56
4.3 Software para diseño de PCBs	66
Capítulo 5 Pruebas y resultados	75
5.1 Esquemático de la PCB	75
5.2 Board de la PCB	76
5.3 Programa pcb-gcode	76
5.4 Ejecución del programa bCNC.....	78
Capítulo 6 Conclusiones.....	84
Apéndice	85
Apéndice 1 hoja de datos de la placa PBX-RF RF Isolated CNC Breakout Board	85
Apéndice 2 hoja de datos de la placa RBX-1 3-Channel Opto-Isolated Relay Board	88
Apéndice 3 cargar el firmware grbl en arduino	90
Bibliografía.....	93

Resumen

La creación y fabricación de diseños con una alta precisión en diversos tipos de materiales como metales, madera, plásticos, etc. requiere de una gran destreza, y suelen ser diseños muy costosos.

Una alternativa son las máquinas de Control Numérico por Computadora (CNC), debido a la precisión con que realiza sus movimientos y dependiendo la cantidad de ejes que tenga va mejorando la calidad en las creaciones de los diseños.

El presente trabajo consiste en el reacondicionamiento de una máquina CNC de 3 ejes, de la Facultad de Ingeniería Eléctrica ubicada en el laboratorio de Electrónica Industrial, el cual comprende la creación y cambio de partes de hardware de la máquina, reutilización de controladores, motores y aislamientos ópticos con los que cuenta, cambio del protocolo de comunicación entre la máquina CNC y computadora, así como la creación de un sistema de nivelación de superficies conductoras y uso de software de diseño.

Palabras Clave

Máquina, Rediseño, CNC, Hardware, Controladores, Aislamiento Óptico, Protocolo de comunicación, Software, Grbl, Eagle, bCNC, Arduino.

Abstract

The creation and manufacture of designs with high precision in various types of materials such as metals, wood, plastics, etc. requires great dexterity, and they are often expensive designs.

An alternative is the Computer Numerical Control (CNC) machines, due to the precision with which it performs its movements, improving the quality of design creations.

The present work consists of the redesign of a CNC machine, from the Faculty of Electrical Engineering located in the Industrial Electronics laboratory, which includes the creation and change of hardware parts of the machine, reuse of controllers, motors and optical isolations with Those that count, change the communication protocol between the CNC machine and the computer, as well as the creation of a leveling system for conductive surfaces and the use of design software.

Keywords

Machine, Redesign, CNC, Hardware, Controllers, Optical Isolation, Communication Protocol, Software, Grbl, Eagle, bCNC, Arduino.

Lista de figuras

Figura 1 primera máquina CNC usada con cinta perforada [5].....	12
Figura 2 diagrama de bloques de una máquina CNC con servomotor [8]	17
Figura 3 ejes lineales y complementarios rotativos de una máquina [9]	18
Figura 4 trayectorias entre puntos [10]	19
Figura 5 formato de bloque de programa CNC (código G) [11]	21
Figura 6 sistemas DNC [16]	26
Figura 7 motor de pasos [29].....	29
Figura 8 servomotor [30].....	31
Figura 9 tipos de servomotores [32]	31
Figura 10 motores controlados por raspberry pi [33]	32
Figura 11 diagrama de bloques de sistema de lazo abierto [35].....	33
Figura 12 sistemas de control a) lazo abierto b) lazo cerrado del ejemplo [37].....	34
Figura 13 motor de pasos de máquina CNC [43]	38
Figura 14 conexión de las bobinas del motor de pasos de la máquina CNC [44]	39
Figura 15 placa con driver de motor de pasos [43].....	40
Figura 16 conector IDC para el driver de motor paso a paso [43]	41
Figura 17 diagrama para motor paso a paso de 6 y 8 cables [43].....	41
Figura 18 placa para el control de drivers y accesorios [43].....	42
Figura 19 pines del puerto paralelo [43]	42
Figura 20 patillas de conectores IDC [43]	43
Figura 21 placa para accesorios de CNC [43]	43
Figura 22 conexión de placa de relés [43].....	44
Figura 23 conexión de placa de relés con la placa de control de motores [43].....	45
Figura 24 micro interruptor reutilizado en máquina CNC [44].....	46
Figura 25 interruptor del botón emergente en máquina CNC [48].....	46
Figura 26 placa arduino UNO [44]	47
Figura 27 husillo de máquina CNC [45]	48
Figura 28 interruptor adaptado en máquina CNC [47]	49
Figura 29 alerta en el software de la máquina CNC	49
Figura 30 señales de entrada con ruido electromagnético.....	50
Figura 31 esquema de filtro pasa bajas pasivo de 1er orden [3].....	50
Figura 32 señales de entrada con y sin el filtro	51
Figura 33 logo del software Fusion 360 [51]	51
Figura 34 logo del software Cura [52]	52
Figura 35 base de husillo diseñada y creada	52
Figura 36 componentes de auto-nivelado.....	53
Figura 37 prueba de auto-nivelado	53
Figura 38 logo del software grbl [50]	54
Figura 39 pines del controlador con grbl v0.9 [51]	55

Figura 40 software bCNC [53]	57
Figura 41 pestaña Inicio en bCNC [54]	59
Figura 42 pantalla de control bCNC [54].....	59
Figura 43 opciones de control de bCNC [54].....	60
Figura 44 visualizador de estado en bCNC [54].....	60
Figura 45 workspaces de trabajo [54].....	61
Figura 46 control de ejes en bCNC [54]	62
Figura 47 herramientas CAM en bCNC [54]	62
Figura 48 pestaña Editor de código g en bCNC [54].....	63
Figura 49 menú de editor en bCNC [54].....	63
Figura 50 visor de trabajo en bCNC [54]	64
Figura 51 planos y controles de vista del visor de trabajo en bCNC [54]	64
Figura 52 sección herramienta de visor de trabajo en bCNC [54]	64
Figura 53 sección mostrar de visor de trabajo en bCNC [54]	65
Figura 54 pantalla de terminal en bCNC [54]	66
Figura 55 PCB con y sin componentes ensamblados [58]	67
Figura 56 elementos de una PCB [58]	67
Figura 57 corte transversal de una PCB [58]	68
Figura 58 pistas de cobre de PCB [58]	68
Figura 59 diferentes capas SolderMask de PCB [58]	69
Figura 60 PADs de una PCB [58].....	69
Figura 61 serigrafía de una PCB [58]	70
Figura 62 capas TOP y BOTTOM de una PCB de 1 capa de cobre [58]	70
Figura 63 capas TOP y BOTTOM en una PCB de 2 capas de cobre [58]	71
Figura 64 vías de una PCB [58].....	71
Figura 65 logo del software Eagle [58].....	72
Figura 66 conversión de esquemático a PCB en Eagle [61]	73
Figura 67 ULP 'pcb-gcode' de Eagle [6]	74
Figura 68 esquemático de la PCB.....	75
Figura 69 Board de la PCB.....	76
Figura 70 selección de ULP "pcb-gcode"	77
Figura 71 archivos generados por el ULP "pcb-gcode".....	77
Figura 72 sistema de sondeo del software bCNC.....	78
Figura 73 selección del archivo de la capa Bottom de la PCB.....	79
Figura 74 visualización de la capa Bottom de la PCB en el software bCNC	79
Figura 75 capa Bottom en los ejes X e Y y cerca de la referencia	80
Figura 76 parámetros de autonivelamiento de la superficie de la PCB	80
Figura 77 datos obtenidos en el autonivelamiento de la placa de cobre	81
Figura 78 inicio del programa cargado	81
Figura 79 PCB terminada en el software bCNC.....	82
Figura 80 PCB fabricada en la placa de cobre	82
Figura 81 PCB conectada al driver de la maquina CNC.....	83

Lista de tablas

Tabla 1 comandos G [1]	24
Tabla 2 comandos M existentes en CNC [2]	24
Tabla 3 características del tipo de conexión de motor de pasos [44]	39
Tabla 4 comandos G aceptados en el controlador [4]	56
Tabla 5 comandos M aceptados en el controlador [4]	56
Tabla 6 requisitos de sistema operativo para Eagle [5]	72

Capítulo 1 Introducción

1.1 Introducción

Actualmente los diseños de piezas creados en computadoras por usuarios son cada vez más complejos de fabricarlos manualmente, debido a que en su mayoría se requiere una mayor precisión en su elaboración.

Gracias al Control Numérico por Computadora (CNC) se ha automatizado el proceso de fabricación de las piezas, ya que permite utilizar un conjunto de instrucciones para controlar el proceso mediante un programa, contando con la mínima intervención humana [1].

El control numérico por computadora (o más comúnmente conocido como CNC) es un sistema que permite controlar en todo momento la posición de un elemento físico (normalmente una herramienta montada en una máquina), sobre los ejes X, Y y Z respecto a un origen (la posición de la máquina), mediante un programa y un conjunto de órdenes añadidas [2], haciendo posible que a una misma pieza se le pueda taladrar, cortar, roscar, fresar, o desbastar en todos sus planos de forma totalmente automática [3].

A continuación, se expone una investigación de los antecedentes a estas máquinas para después exponer los objetivos y justificación de este trabajo.

1.2 Antecedentes

El CNC surgió a partir de los trabajos realizados por el ingeniero estadounidense John T. Parsons, en el año 1940. A fines de ese año, Parsons concibió el uso de tarjetas perforadas como sistema de coordenadas de posición para controlar una máquina herramienta (nombre que se le da a una herramienta montada en una máquina). La máquina controlada se movía en pequeños incrementos y era capaz de generar el acabado deseado.

Para 1948, Parsons demostró este concepto a la Fuerza Aérea de Estados Unidos, quienes posteriormente patrocinaron una serie de proyectos en los laboratorios del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) [1].

Finalmente, en 1952 John T. Parsons y el Instituto Tecnológico de Massachusetts desarrollaron la primera máquina fresadora de control numérico, construida con bulbos, usando un código binario y cinta perforada con lo que a finales de los 60's nació el control numérico por computadora [4].

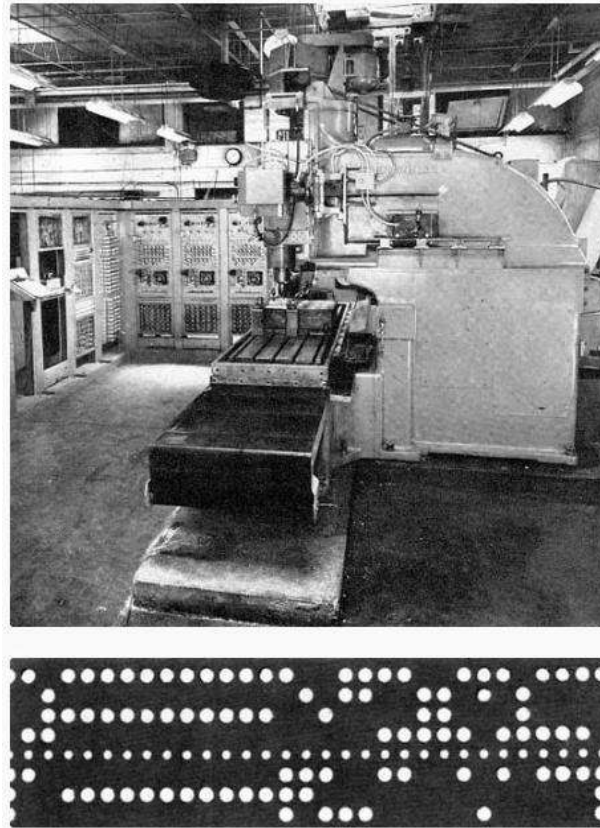


Figura 1 primera máquina CNC usada con cinta perforada [5]

La primera generación de máquinas CNC utilizaba grandes equipos controladores de válvulas de vacío, que consumían una gran cantidad de energía eléctrica y generaban mucho calor. Los modelos de la segunda generación sustituyeron los tubos de vacío por transistores de mayor fiabilidad, con menor consumo de energía y que ocupaban menos espacio. Estas máquinas de la primera y segunda generación de controladores no tenían memoria. El controlador tenía que ser alimentado con instrucciones, de una en una desde una fuente externa, como el lector de cinta. El controlador aceptaba una sola instrucción (o comando), lo ejecutaba, aceptaba el comando siguiente, lo ejecutaba y así sucesivamente [6].

Los controladores se desarrollaron rápidamente con los equipos analógicos y digitales y con el abaratamiento y miniaturización de los procesadores se generalizó la electrónica digital, lo que dio lugar a la denominación control decimal numérico, control numérico por computadora, control numérico por computador o control numérico computarizado (CNC), para diferenciarlas de las máquinas que no tenían computadora.

En la actualidad se usa el término control numérico para referirse a este tipo de sistemas, con o sin computadora. Además, encontramos máquinas CNC en casi todas partes, que ya no solo abarcan los grandes establecimientos industriales, sino también talleres de todo tipo, tanto de

pequeña como mediana relevancia. De hecho, muchas personas pueden comprar, e incluso diseñar, sus propias máquinas CNC caseras debido al avance de la tecnología hoy en día.

Prácticamente no existe ámbito alguno de un proceso de fabricación que no dependa de estas poderosas y versátiles máquinas. Sin embargo, a pesar de su amplia aplicación, pocos fuera del entorno industrial están familiarizados con el fundamento de la tecnología CNC y desconocen su funcionamiento y utilidad.

1.3 Justificación

En el laboratorio de Electrónica Industrial de la Facultad de Ingeniería Eléctrica se cuenta con una máquina CNC de 3 ejes que está en desuso debido a la obsolescencia del puerto paralelo de comunicación LPT1 (Line Print Terminal), lo cual limita a ser controlada solo por equipos que contengan este tipo de comunicación; además de la falta de componentes que requiere la máquina.

Mediante este trabajo de tesis será posible el uso y manejo de la máquina CNC para la fabricación de diseños en superficies de diferentes tipos de materiales como es el caso de la fabricación de placas de circuito impreso (PCBs) en placas de cobre, también fabricación de diseños en madera, plásticos entre otros, brindando control, estabilidad, precisión en la fabricación de estos diseños, así como protección no solo al área de trabajo sino también al usuario dando una comodidad y evitar inconvenientes para la fabricación de diseños realizados.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Reacondicionar la maquina CNC del laboratorio de electrónica industrial, mediante el uso de plataformas o componentes de comunicación más actuales, que permitan utilizar la misma en diferentes aplicaciones CNC.

1.4.2 Objetivos específicos

- * Fabricación de diseños en materiales moldeables como acrílico, plásticos, madera, MDF (fibropanel de densidad media) y PCBs (placas de circuito impreso).
- * Brindar el control y monitoreo en tiempo real de los diseños realizados.
- * Desarrollar un sistema de medición y corrección de diseños en superficies conductoras permitiendo una mejora en la precisión de grabado.

1.5 Metodología

El presente trabajo realizado se ha estructurado en seis capítulos los cuales se han desarrollado realizando investigación en artículos web, hojas de datos, documentación oficial de controladores, así como recursos multimedia.

En términos generales, se han abordado de la siguiente manera:

- Capítulo I Introducción. Plantea objetivos y razones de la importancia por la que se ha realizado este proyecto, así como algunos breves antecedentes relacionados a este trabajo.
- Capítulo II Marco teórico. Se dan detalles y antecedentes sobre este tipo de máquinas, para comprender su funcionamiento y lenguaje actual.
- Capítulo III Hardware CNC disponible. Se explica a detalle los elementos con los que cuenta la maquina actualmente, los componentes obsoletos, y elementos nuevos a introducir para su correcto funcionamiento.
- Capítulo IV Software utilizado. Se explican los programas utilizados para actualizar la máquina, así como el uso de algunos para el diseño de piezas y PCBs.
- Capítulo V Pruebas y resultados. Se muestran las pruebas que se realizaron con la máquina CNC, así como los resultados que se generaron de dichas pruebas.
- Capítulo VI Conclusiones. Se expone los argumentos y afirmaciones obtenidas al finalizar el trabajo.

Capítulo 2 Marco teórico

2.1 Introducción

En este capítulo se aborda la teoría necesaria para entender el funcionamiento en una máquina de control numérico por computadora (CNC), la tecnología de comunicación entre máquina y computadora, tipos de máquinas CNC más comunes y clasificación de los controles numéricos, así como las tecnologías involucradas en las mejoras de un sistema CNC.

Se inicia haciendo una revisión del principio de funcionamiento de estas máquinas, con la finalidad de entender su comportamiento para finalmente explicar con detalle las tecnologías usadas en el desarrollo de este trabajo.

2.2 Principio de funcionamiento

El control numérico (CN) o control decimal numérico es un sistema de automatización de máquinas herramienta que se controla a través de números, letras y otros símbolos, en un medio de almacenamiento. Estos números, letras y símbolos están codificados en un formato apropiado para definir un programa de instrucciones para desarrollar una tarea concreta. Cuando la tarea en cuestión cambia, se cambia el programa de instrucciones [7].

El principio de operación común de todas las aplicaciones del control numérico es el control de la posición relativa de una herramienta o elemento de procesado con respecto al objeto a procesar.

En una máquina CNC, a diferencia de una máquina convencional o manual, una computadora controla la posición y velocidad de los motores que accionan los ejes de la máquina [7].

En pocas palabras, el control numérico computarizado es el uso de una computadora para controlar y monitorear los movimientos de una máquina herramienta.

Las máquinas CNC modernas cuentan con una computadora dedicada que forma parte del equipo, y la mayoría dispone de un sofisticado sistema de realimentación que monitorea y ajusta constantemente la velocidad y posición de la herramienta. Las máquinas menos exigentes usadas en talleres admiten el uso de una computadora personal externa. El controlador CNC trabaja en conjunto con una serie de motores (servomotores y/o motores paso a paso), así como componentes de accionamiento para desplazar los ejes de la máquina de manera controlada y ejecutar los movimientos programados [8].

Una máquina CNC, por lo tanto, consiste en seis elementos principales:

1. **Dispositivo de entrada.** Es el mecanismo por medio del cual el programa es introducido en el control de la máquina CNC. Los dispositivos de entrada más utilizados son teclados, unidades de memoria, puertos serie y redes.
2. **Unidad de control o controlador (MCU).** Es la parte responsable de interpretar el conjunto de instrucciones por medio de un software especializado y realizar las acciones que este le indique, como coordinar las señales de salida hacia los drivers e interpretar las señales de entrada. Las señales de entrada son las recibidas de los diferentes dispositivos conectados a la máquina como los límites de carrera y el paro de emergencia. Las señales de salida son las enviadas a la máquina para coordinar el movimiento de los motores y sus demás elementos.
3. **Sistema de accionamiento.** Un sistema de accionamiento consta de circuitos amplificadores (conocidos también como drives, drivers, controladora de motores o impulsores), motores y transmisiones. La MCU envía las señales de control (posición y velocidad) a los circuitos amplificadores de cada eje. Las señales de control se aumentan para accionar los motores que por medio de las transmisiones convierten su movimiento rotativo en movimientos lineal de los ejes de la máquina.
4. **Máquina herramienta.** La máquina herramienta es el conjunto de elementos que conforman la estructura mecánica que realiza el trabajo deseado. Está compuesta de guías lineales, herramientas de corte, rodamientos, soportes, transmisiones, cabezales, poleas, engranes, placas y tornillos.
5. **Monitor.** El monitor consiste en mostrar información operativa en tiempo real y casi en tiempo real. Proporcionan gráficos de procesos visuales de parámetros del proceso.
6. **Dispositivos de realimentación.** Estos sistemas solo se encuentran en sistemas con servomotores ya que estos motores se pueden ajustar mediante un sistema con realimentación.

La siguiente figura muestra un diagrama de bloques de una máquina CNC típica, provista de servomotores.

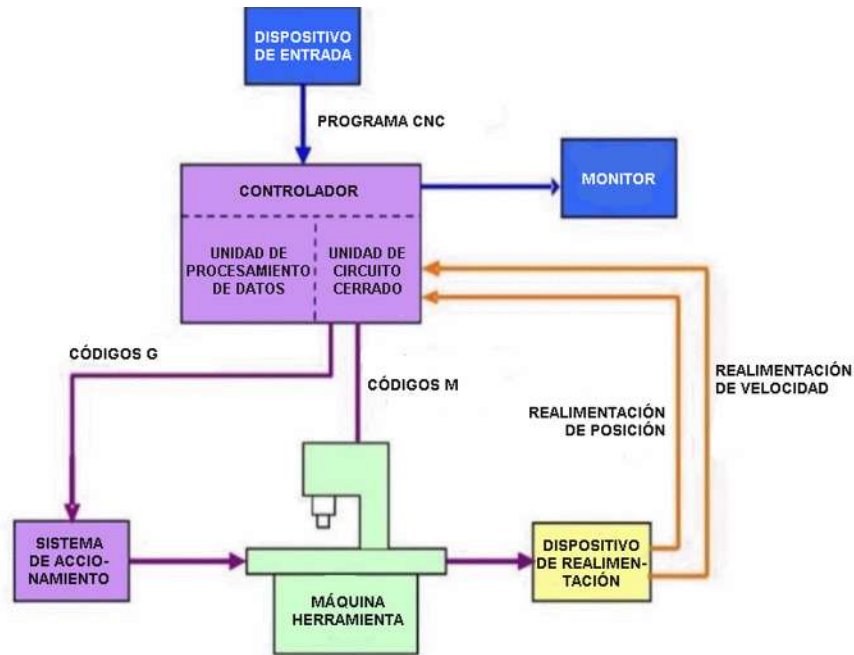


Figura 2 diagrama de bloques de una máquina CNC con servomotor [8]

Como se observa en la figura anterior, básicamente, el controlador de las máquinas CNC recibe instrucciones de la computadora (en forma de códigos G y códigos M) y mediante su propio software convierte esas instrucciones en señales eléctricas destinadas a activar los motores que, a su vez, pondrán en marcha el sistema de accionamiento.

Para comprender en términos generales cómo funciona una máquina CNC se examinan algunas de las funciones específicas que pueden programarse como lo son:

- Control de movimiento
- Accesorios programables
- Programa CNC
- Controlador CNC
- Programa CAM
- Sistema DNC

2.2.1 Control de movimiento

Todas las máquinas CNC comparten una característica en común la cual es tener dos o más direcciones programables de movimiento llamadas ejes. Un eje de movimiento puede ser lineal (en línea recta) o rotatorio (en una trayectoria circular) llamado eje complementario.

Los ejes de una máquina CNC son un requisito para generar los movimientos necesarios para el proceso de fabricación y se denominan con letras.

Los nombres más comunes de los ejes lineales son X, Y y Z, mientras que los más comunes de los ejes complementarios son A, B y C.

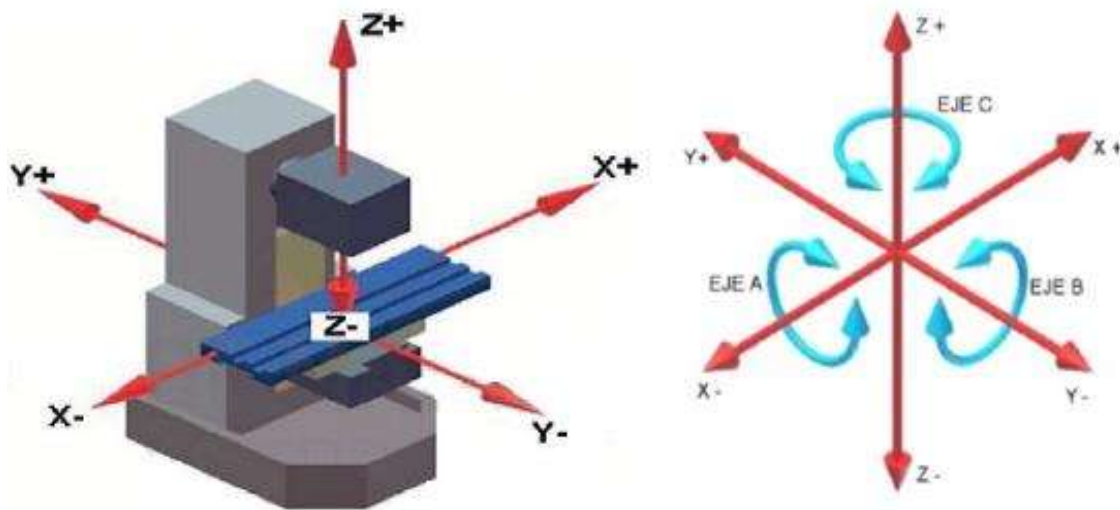


Figura 3 ejes lineales y complementarios rotativos de una máquina [9]

Eje X: horizontal y paralelo a la superficie de sujeción de la pieza. Se asocia con el movimiento en el plano horizontal longitudinal de la mesa.

Eje Y: ortogonal con los ejes X y Z. Se asocia con el movimiento en el plano horizontal transversal de la mesa.

Eje Z: ubicación donde va montada la herramienta, es el que posee la potencia de corte y puede adoptar distintas posiciones según las posibilidades del cabezal. Se asocia con el desplazamiento vertical del cabezal de la máquina.

Ejes A, B y C: son ejes asociados a los ejes X, Y y Z, ya que como se observa en la figura anterior el eje A está en la misma dirección al eje X, pero en lugar de un movimiento lineal este eje tiene un movimiento rotativo, así como los ejes B y C están asociados a los ejes Y y Z. Se llaman complementarios debido a que estos ejes (A, B, C) ocupan el movimiento lineal de los ejes lineales X, Y y Z, haciendo los ejes A, B y C complementos de los ejes X, Y y Z.

El control de movimiento puede realizarse mediante dos sistemas de coordenadas con valores diferentes, que pueden funcionar individualmente o combinados entre sí los cuales son:

- Valores absolutos: las coordenadas del punto de destino son referidas al punto de origen de coordenadas.

- Valores incrementales: las coordenadas del punto de destino son referidas al punto actual.

Para entender claramente estos sistemas de coordenadas se presenta un ejemplo que se muestra a continuación.

En la figura siguiente se presenta un plano cartesiano, en el cual se muestran las trayectorias que debe realizar una herramienta para posicionarse entre puntos, que van del punto A al punto D.

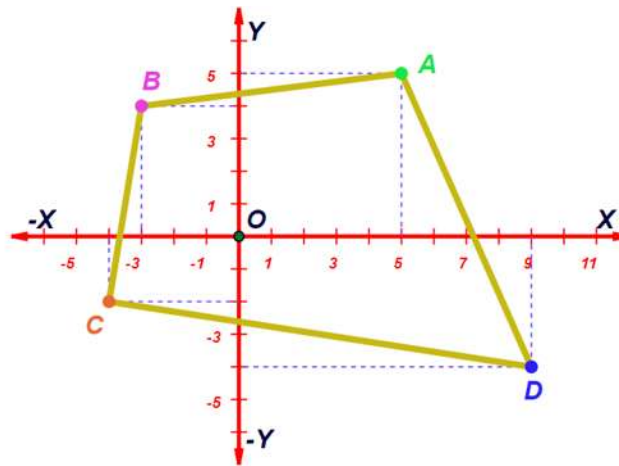


Figura 4 trayectorias entre puntos [10]

En el caso concreto de programación CNC, para mover la herramienta se deben realizar trayectorias y para esto es importante conocer especialmente el punto de inicio y el punto final de la trayectoria.

Para el ejemplo de la figura, primeramente, se debe establecer un origen y de ahí establecer los puntos para las trayectorias que debe realizar la herramienta.

La primera trayectoria de la herramienta tiene que ser desde el punto "A" al punto "B", una vez ahí se realiza la siguiente trayectoria que es del punto "B" al punto "C", continuando con otra trayectoria del punto "C" al punto "D" y finalmente una trayectoria del punto "D" al punto "A".

Para realizar las trayectorias con un sistema de coordenadas con valores absolutos, se establece un punto de origen, y se continua con las distancias que hay entre los ejes "X" e "Y" respecto al origen, siendo así:

- $0 \rightarrow X0 Y0$ // Se establece el origen
- $A \rightarrow X5 Y5$ // Se establece el punto A
- $B \rightarrow X-3 Y4$ // Se establece el punto B
- $C \rightarrow X-4 Y-2$ // Se establece el punto C
- $D \rightarrow X9 Y-4$ // Se establece el punto D
- $A \rightarrow X5 Y5$ // Se vuelve establecer el punto A.

Siguiendo las mismas trayectorias anteriores, pero con el sistema de coordenadas con valores incrementales, se debe tomar en cuenta que el punto final al término de cada trayectoria, será el nuevo origen de la trayectoria siguiente, es decir, que se especifica como nuevo punto inicial el que fuera el punto al final de la trayectoria anterior. Esto sucederá en cada punto final establecido durante las diferentes trayectorias en este sistema de coordenadas con valores incrementales. Siendo así:

- `O → X0 Y0 //` Se establece el origen
- `A → X5 Y5 //` Se establece el punto A (nuevo origen X0 Y0 en trayectoria siguiente)
- `B → X8 Y-1 //` Se establece el punto B (nuevo origen X0 Y0 en trayectoria siguiente)
- `C → X-1 Y-6 //` Se establece el punto C (nuevo origen X0 Y0 en trayectoria siguiente)
- `D → X13 Y-2 //` Se establece el punto D (nuevo origen X0 Y0 en trayectoria siguiente)
- `A → X-4 Y9 //` Se vuelve establecer el punto A con nuevos valores para el retorno.

Como se puede observar es muy diferente el tipo de sistema de valores que se quiera utilizar para el control de movimiento de una máquina CNC.

Las máquinas CNC son capaces de mover la herramienta al mismo tiempo en los 3 ejes establecidos (X, Y y Z), para ejecutar trayectorias tridimensionales lo que ayuda a realizar movimientos que no se pueden lograr manualmente como círculos, líneas diagonales y figuras complejas tridimensionales [7].

2.2.2 Accesorios programables

Casi todas las máquinas CNC son programables de varias maneras. El tipo específico de máquina está directamente relacionado con sus accesorios programables apropiados, por lo que puede programarse cualquier función requerida. Así, por ejemplo, contará al menos con una de las siguientes funciones específicas programables:

- *Cambiador automático de herramienta:* algunas máquinas CNC pueden tener muchas herramientas diferentes ubicadas en un portaherramientas. Cuando se requiera, la herramienta necesaria puede colocarse automáticamente en el husillo (herramienta) para efectuar el proceso correspondiente.
- *Velocidad y activación del husillo:* el husillo es la herramienta de la máquina CNC y esta puede girar o no, como es el caso de un buril en un torno CNC el cual esta herramienta no gira si no los ejes. En el caso de herramientas que giran como motores

la velocidad se puede especificar fácilmente, además de poder girar no sólo en sentido horario, sino también en sentido antihorario.

- *Refrigerante*: muchas operaciones de fabricación requieren de refrigerante para lubricar y enfriar. El refrigerante puede activarse y desactivarse durante el ciclo de trabajo de la máquina [8].

2.2.3 Programa CNC

El programa es un listado secuencial de instrucciones que ejecuta la máquina. Esas instrucciones se conocen como programa CNC, el cual debe contener toda la información requerida para la fabricación de la pieza.

El programa CNC está escrito en un lenguaje de bajo nivel denominado código G, estandarizado por las normas 6983 de ISO (Organización Internacional de Normalización) y RS274 de EIA (Alianza de Industrias Electrónicas), las instrucciones Generales son los comandos G y las instrucciones Misceláneas son comandos M. El programa presenta un formato de frases conformadas por bloques, encabezados por la letra N, donde cada movimiento o acción se realiza secuencialmente y donde cada bloque está numerado, tal como en la figura siguiente:

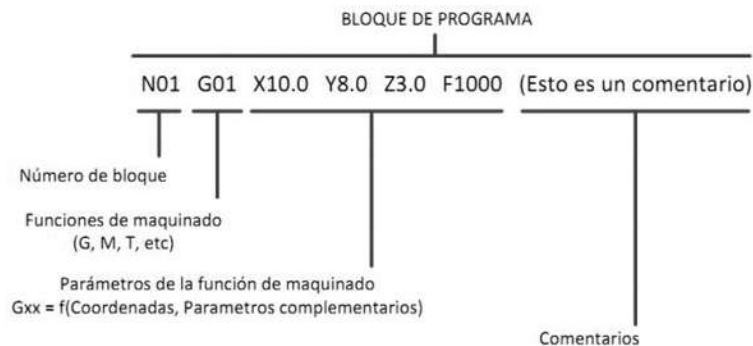


Figura 5 formato de bloque de programa CNC (código G) [11]

Los comandos G describen las funciones de movimiento de la máquina (por ejemplo, movimientos rápidos, avances, avances radiales, pausas, ciclos), mientras que los comandos M describe las funciones misceláneas que se requieren para la fabricación de la pieza, pero que no corresponden a los movimientos de la máquina (por ejemplo, arranque y detención del husillo, cambio de herramienta, refrigerante, detención del programa).

A su vez, contiene variables (direcciones), identificadas con otras letras y definidas por el programador para cada función específica. Por ejemplo:

- **F**: define la velocidad de avance
- **S**: la velocidad del husillo

- **T**: la herramienta seleccionada,
- **X, Y y Z**: el movimiento de los ejes
- **I, J y K**: la localización del centro de un arco, etc. [8].

Se debe tener en cuenta que, dado que todas las máquinas CNC son diferentes, cada máquina tendrá su propio programa CNC, ya que por ejemplo, una plegadora de chapas no tiene husillo ni requiere de refrigerante. En las siguientes tablas se muestran la mayoría de comandos G y M existentes en la norma ISO, los cuales dependiendo el tipo de CNC a utilizar aceptará algunos de estos comandos:

G00	Posicionamiento rápido	G92	Preselección de coordenadas
G01	Interpolación lineal	G93	Especificación del tiempo de mecanizado en segs.
G02	Interpolación circular horario	G94	Avance en mm/min (pulgadas/min)
G03	Interpolación circular antihorario	G95	Avance en mm/rev (pulgadas/rev)
G04	Temporización	G96	Velocidad de corte constante
G05	Arista matada controlada (modal)	G97	Velocidad de giro constante
G06	Centro del arco en coordenadas absolutas (no modal)	G100	Medición con palpador
G07	Arista viva (modal)	G101	Incluir offset resultante de la medición
G08	Arco tangente a la trayectoria anterior	G102	Excluir offset resultante de la medición
G09	Arco definido mediante tres puntos	G108	Adaptación del avance al comienzo del bloque
G10	Anulación de imagen espejo	G109	Adaptación del avance al final del bloque
G11	Imagen espejo en el primer eje del canal	G112	Cambio de la gama de parámetros de un eje
G12	Imagen espejo en el segundo eje del canal	G130	Porcentaje de aceleración a aplicar, por eje
G13	Imagen espejo en el tercer eje del canal	G131	Porcentaje de aceleración a aplicar, global
G14	Imagen espejo en las direcciones programadas	G132	Porcentaje de jerk a aplicar, por eje
G17	Plano principal X-Y, y eje longitudinal Z	G133	Porcentaje de jerk a aplicar, global
G18	Plano principal Z-X, y eje longitudinal Y	G134	Porcentaje de Feed-Forward a aplicar
G19	Plano principal Y-Z, y eje longitudinal X	G135	Porcentaje de AC-Forward a aplicar
G20	Plano principal por dos direcciones y eje longitudinal	G136	Transición circular entre bloques
G30	Preselección del origen polar	G137	Transición lineal entre bloques
G33	Roscado electrónico de paso constante	G138	Activación/cancelación directa de la compensación
G36	Redondeo de aristas	G139	Activación/cancelación indirecta de la compensación
G37	Entrada tangencial	G145	Congela/recupera el control tangencial
G38	Salida tangencial	G151	Programación en diámetros
G39	Achaflanado de aristas	G152	Programación en radios
G40	Anulación de la compensación de radio	G157	Exclusión de ejes en el traslado de origen
G41	Compensación de radio de herramienta a la izquierda	G158	Traslado de origen incremental
G42	Compensación de radio de herramienta a la derecha	G159	Traslados de origen absolutos adicionales
G45	Activación/desactivación del control tangencial	G170	Desactivación de ejes Hirth
G50	Arista semimatada	G171	Activación de ejes Hirth
G53	Cancelación del decalaje de origen	G180	Subrutinas OEM
G54	Traslado de origen absoluto 1	G192	Limitación de la velocidad de giro en corte constante
G55	Traslado de origen absoluto 2	G193	Interpolación del avance
G57	Traslado de origen absoluto 4	G196	Avance del punto de corte constante
G58	Traslado de origen absoluto 5	G197	Avance del centro de la herramienta constante
G59	Traslado de origen absoluto 6	G198	Definición de los límites inferiores de software
G60	Arista viva (no modal)	G199	Definición de los límites superiores de software
G61	Arista matada controlada (no modal)	G200	Intervención manual exclusiva
G63	Roscado rígido	G201	Activación de la intervención manual aditiva
G70	Programación en pulgadas	G202	Cancelación de la intervención manual aditiva
G71	Programación en milímetros	G261	Centro del arco en coordenadas absolutas (modal)
G72	Factor escala	G262	Centro del arco respecto del punto inicial
G73	Giro del sistema de coordenadas	G263	Programación del radio del arco
G74	Búsqueda de referencia máquina	G264	Cancelación de la corrección del centro del arco
G90	Programación en coordenadas absolutas	G265	Activación de la corrección del centro del arco
G91	Programación en coordenadas incrementales	G266	Porcentaje de avance al 100%

Tabla 1 comandos G [1]

M00	Paro del programa
M01	Paro opcional
M02	Fin del programa
M03	Giro del husillo en sentido horario
M04	Giro del husillo en sentido antihorario
M05	Paro del husillo
M06	Cambio programado de la herramienta
M08	Activa el refrigerante
M09	Apaga el refrigerante
M10	Abre la prensa de trabajo
M11	Cierre de la prensa de trabajo
M29	Control de la máquina por medio de una computadora. Final de programa
M30	Fin del programa y regreso al inicio del mismo
M38	Abrir la puerta
M39	Cierra la puerta
M63	Se activa una señal de salida
M65	Desactiva la señal de salida
M66	Ordena una señal de espera activada por el manipulador
M76	Ordena una señal de espera desactivada por el robot
M98	Ordena la llamada a un subprograma
M99	Ordena el fin del programa, regresa al inicio y hace que el ciclo se cumpla en varias ocasiones

Tabla 2 comandos M existentes en CNC [2]

Conforme a la tabla anterior, se presenta el siguiente ejemplo de código G en conjunto con su explicación.

N0040 G01 X25.000 Z32.000 F500

Indicaría lo siguiente:

Número del bloque: 0040

Procedimiento a realizar: G01, es decir, trasladarse al punto (X=25 mm, Z=32 mm) a través de una línea recta.

Avance: 500 (mm/rev o mm/min, según se haya especificado previamente).

2.2.4 Controlador CNC

El controlador CNC recibe los comandos, los interpreta y ejecuta mediante el accionamiento del hardware conectado; puede además hacer otras acciones como las siguientes:

- Especificar ciertas entradas importantes del operador, tales como interruptores de paro o botones de emergencia.

- Comunicación entre la computadora y la máquina CNC.
- Realizar funciones de verificación especial (como la deformación en placas conductoras) para fabricar con exactitud el diseño del programa CNC.

2.2.5 Programa CAM

El sistema CAM es un término inglés cuyo significado es fabricación asistida por computadora. Se utiliza para controlar, entre otras aplicaciones, máquinas-herramienta CNC en la fabricación de piezas manufacturadas, como puede ser un perfil de tubo o una plancha de metal, y prototipos [14].

Un programa CAM es usado cuando se dificulta la escritura del programa CNC, ya sea por desconocimiento del operario o trabajos complicados. En muchos casos, el programa CAM funciona conjuntamente con el diseño CAD (Diseño asistido por Computadora por sus siglas en inglés). Esto elimina la necesidad de redefinir la configuración de la pieza de trabajo para el programa CAM. El programador CNC simplemente especifica las operaciones de fabricación a realizar, y el programa CAM crea automáticamente el programa CNC [8].

Entonces se puede decir que el sistema o programa CAM es un puente entre la tecnología CAD (responsable de los diseños de planos 2D y 3D de piezas) y el lenguaje de programación de las máquinas-herramienta (las líneas de palabras CNC que dan instrucciones cuando forman frases) para fabricar las piezas diseñadas.

El sistema CAM toma la información del diseño y genera la ruta que tiene que seguir la herramienta para fabricar la pieza deseada. A partir de esta ruta se crea automáticamente el programa de maquinado, el cual puede ser introducido a la máquina mediante un dispositivo de almacenamiento (Pendrive, CD, etc.) o enviado directamente desde una computadora.

Sin el sistema CAM, habría que transformar el diseño CAD en líneas de palabras CNC a mano, directamente en la máquina (qué eje debe trabajar, con qué velocidad de avance, con qué velocidad de cabezal, etc., para llevar a cabo el diseño). Normalmente se habla de sistema CAD/CAM debido a la unión que forman los 2 sistemas [14].

Hoy en día los equipos CNC con la ayuda de los lenguajes de comunicación con usuarios y los sistemas CAD/CAM, permiten a los usuarios producir piezas con mucha mayor rapidez y calidad sin necesidad de tener un alto conocimiento.

Las aplicaciones CAM se utilizan generalmente para generar el código G. Se utiliza principalmente las extensiones de archivo. tap y .nc, aunque existen decenas de otras extensiones que cumplen la misma función. Finalmente, todas son extensiones de texto. Se puede utilizar cualquier editor de texto para crear o editar el archivo (es decir, el block de notas, Wordpad, etc.), pues son archivos de texto [11].

2.2.6 Sistema DNC

Una vez que se desarrolla el programa CNC (ya sea manualmente o con un programa CAM), debe cargarse en el controlador y para ello se usa un sistema de distribución de control numérico llamado control numérico directo (DNC) que es un término de fabricación común para las máquinas herramienta CNC en red [15].

Un sistema DNC es una computadora conectada en red con una o más máquinas CNC.

Si la computadora está conectada a varias máquinas, puede distribuir programas a diferentes máquinas según sea necesario. Las redes DNC o la comunicación DNC siempre se requieren cuando los programas CAM se ejecutan en algún control de máquina CNC [15].

En algunos controladores de máquina CNC, la memoria disponible es demasiado pequeña para contener el programa de fabricación (por ejemplo, mecanizar superficies complejas), por lo que en este caso el programa se almacena en una computadora separada y se envía directamente a la máquina, un bloque a la vez.

Tradicionalmente la transferencia de los programas se efectuaba mediante un protocolo rudimentario de comunicaciones seriales (RS-232C). Sin embargo, la tecnología ha avanzado para dotar a los controladores actuales con mayores capacidades de comunicación, de manera que puedan conectarse en red de maneras más convencionales, por ejemplo, mediante Ethernet [8].

El DNC consta básicamente de tres componentes:

- Control numérico de la máquina herramienta
- Computador
- Línea serial que los conecta

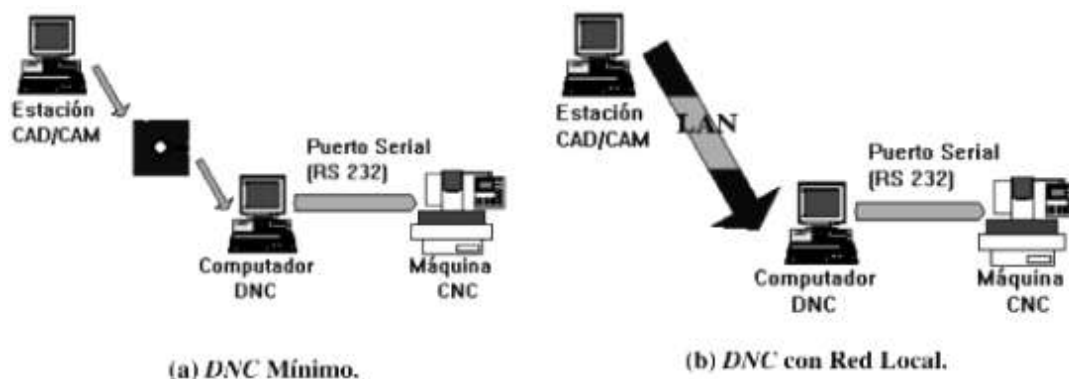


Figura 6 sistemas DNC [16]

2.3 Máquinas CNC más comunes y clasificación de controles numéricos

Las máquinas CNC son controladas automáticamente por coordenadas preestablecidas lo que provoca que sean capaces de realizar todo tipo de actividades tales como cortar, moldear o perfeccionar un modelo físico. También son capaces de hacer actividades más complejas con elementos industriales más pesados y complejos como lo es taladrar, ensamblar, fresar o desbastar en diferentes tipos de materiales.

Dado a su utilidad dentro del mundo industrial ha alcanzado fama, y ha llevado a la creación de diferentes tipos de CNC gracias a los avances tecnológicos cuyos objetivos principales son precisos y específicos para cada tipo de trabajo a los que están destinados [17].

Las máquinas CNC más frecuentes son:

- Tornos
- Fresadoras
- Enrutador
- Cortadoras láser
- Cortadoras de plasma
- Cortadoras por chorro de agua
- Cortadoras por electroerosión
- Estampadora
- Prensa
- Brazo robotizado
- Soldadoras
- Taladros
- Impresoras 3D

Sin embargo, los tipos de maquinaria CNC se clasifican según la manera en que realizan su control de trayectorias, es decir, en su procedimiento para cortar, perforar, moldear, devastar, mecanizar, etc. ya que con la incorporación de un sistema de control numérico en máquinas herramienta, ha sido posible implementar máquinas CNC en industrias, talleres, laboratorios, máquinas caseras, etc., hasta llegar a los centros de mecanizado y centros de torneado, que incorporan sistemas de cambio automático de piezas y herramientas.

Debido a las diferencias entre máquinas CNC, a las dificultades técnicas en el diseño de los controladores y a condiciones de tipo económico, han aparecido diversos tipos de controles numéricos que pueden clasificarse:

- Por su sistema de referencia

- Por su tipo de accionamiento
- Por el lazo de control
- Por el control de las trayectorias
- Por la tecnología de control [18].

Clasificación por el sistema de referencia

En los sistemas de Control Numéricos (CN) la pieza a ser maquinada se fija a una mesa de trabajo mientras que la máquina herramienta se mueve en torno a ella. De este modo el sistema de referencia se fija con respecto a la mesa de trabajo.

Estos sistemas de referencia pueden ser:

- Sistemas de referencia con cero fijo: el origen está fijada por el fabricante (no se puede modificar).

El origen siempre se localiza en la misma posición con respecto a la mesa de trabajo. Normalmente, esta posición es la esquina inferior de la izquierda de la mesa de trabajo y todas las posiciones se localizan a lo largo de los ejes XY positivos y relativos a ese punto fijo de referencia.

- Sistemas de referencia con cero flotante: son las más comunes en las máquinas con control numérico, permiten que el operador fije el origen del sistema en cualquier posición de la mesa de trabajo.

La localización de esta referencia se realiza al principio de la tarea, el operador mueve la herramienta mediante control manual al punto que se desea como origen del sistema de referencia y presiona un botón indicándole a la máquina que en ese punto se encuentra el origen [18].

Clasificación por el tipo de accionamiento

Dada la gran variedad que existe de máquinas CNC los accionamientos de estas máquinas suelen utilizarse de diferente manera por lo que hablaremos de manera general de cómo están constituidos estos accionamientos.

Se entiende como accionamiento aquel elemento o dispositivo de una máquina capaz de transformar algún tipo de energía, ya sea eléctrica, neumática o hidráulica, térmica etc., en energía mecánica para aplicarla en dicha máquina [19].

En el caso de las máquinas CNC más comunes sus accionamientos contienen actuadores lo que permite clasificarlas en accionamientos del tipo:

- Hidráulico (Cilindros y motores)
- Neumático (Cilindros y motores)
- Eléctrico (Motores de pasos y servomotores).

La máquina herramienta a utilizar usa motores eléctricos y debido a esto se hablará sobre el accionamiento eléctrico.

Accionamiento eléctrico

Una máquina CNC con accionamiento eléctrico realiza los movimientos de forma automática a partir de las órdenes recibidas por el ordenador, este movimiento automático es debido a motores que realizan dicho movimiento, además de realizar el movimiento tienen el poder de desplazarse y mantener la posición indicada por el ordenador [28]. Estos motores en la mayoría de las máquinas CNC son de dos tipos:

- Motores de pasos
- Servomotores

Motor de pasos

Un motor de pasos es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de pulsos eléctricos en desplazamientos angulares, lo que significa que es capaz de girar una cantidad de grados (paso o medio paso) dependiendo de sus entradas de control [29].



Figura 7 motor de pasos [29]

Los motores de pasos son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos. La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde 90° hasta pequeños movimientos de 1.8° , Es por eso que ese tipo de motores son muy utilizados, ya que pueden moverse a deseo del usuario según la secuencia que se les indique a través de un microcontrolador.

El principio de funcionamiento está basado en un estator construido por varios bobinados en un material ferromagnético y un rotor que puede girar libremente en el estator.

Estos diferentes bobinados son alimentados uno seguido del otro y causan un determinado desplazamiento angular que se denomina “paso angular” y es la principal característica del motor.

Existen tres tipos de motores de pasos:

- De reluctancia variable
- De imán permanente (unipolares y bipolares)
- Híbrido

Estos motores poseen la habilidad de quedar enclavados en una posición si una o más de sus bobinas está energizada o bien totalmente libres de corriente.

Servomotor

El servomotor es un dispositivo electromecánico que consiste en un motor eléctrico, un juego de engranes y una tarjeta de control, todo dentro de una carcasa (plástico o metal).

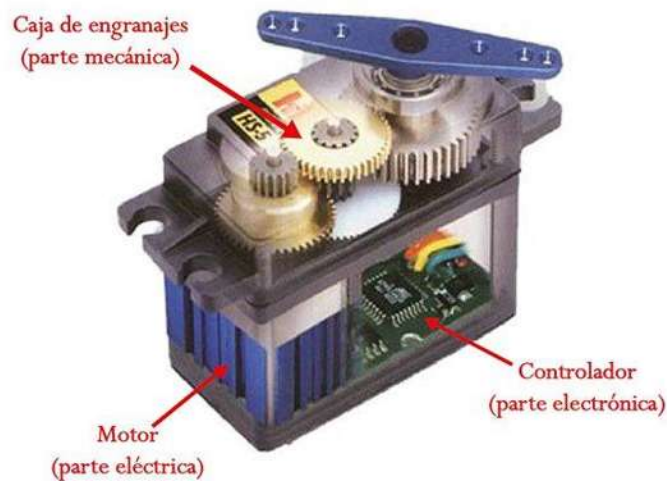


Figura 8 servomotor [30]

Un servo tiene la capacidad de ser controlado en posición. Es capaz de ubicarse en cualquier posición dentro de un rango de operación generalmente de 180° pero puede ser fácilmente modificado para tener un giro libre de 360° .

Este tipo de motores requiere la necesidad de una señal de control lo cual hace que sea imposible utilizarlos sin un circuito de control adecuado. Esto se debe a que para que el circuito de control interno funcione, es necesaria una señal de control modulada [31]. Por esta razón los servomotores funcionan por medio de modulación de ancho de pulso (PWM).

Existen servomotores para todo tipo de usos. En la industria, robótica, en el interior de las impresoras, máquinas CNC, y modelismo debido a su gran precisión en el posicionamiento.

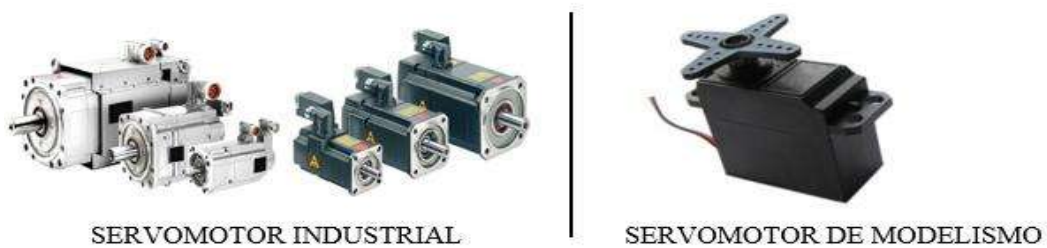


Figura 9 tipos de servomotores [32]

Los accionamientos eléctricos son los más utilizados y los que poseen un mayor campo de aplicación en las máquinas CNC dada la fácil disponibilidad de la energía eléctrica a través de las redes de distribución. Además, son altamente versátiles debido a que se utilizan conductores eléctricos para transmitir señales de control y electricidad, por lo que prácticamente no hay restricciones respecto a la distancia entre la fuente de poder y el actuador (accionamiento).

Existen actuadores que dependen de una etapa previa, como son los accionamientos neumáticos o hidráulicos (un accionamiento eléctrico debe mover inicialmente un compresor o una bomba), o en los gravitatorio (previamente se tiene que desplazar el elemento que caerá por gravedad), etc. [19].

En la siguiente figura se muestra cómo se controlan los motores antes mencionados mediante una unidad de control (computadora) lo cual da una idea de cómo son los actuadores eléctricos en una máquina CNC.

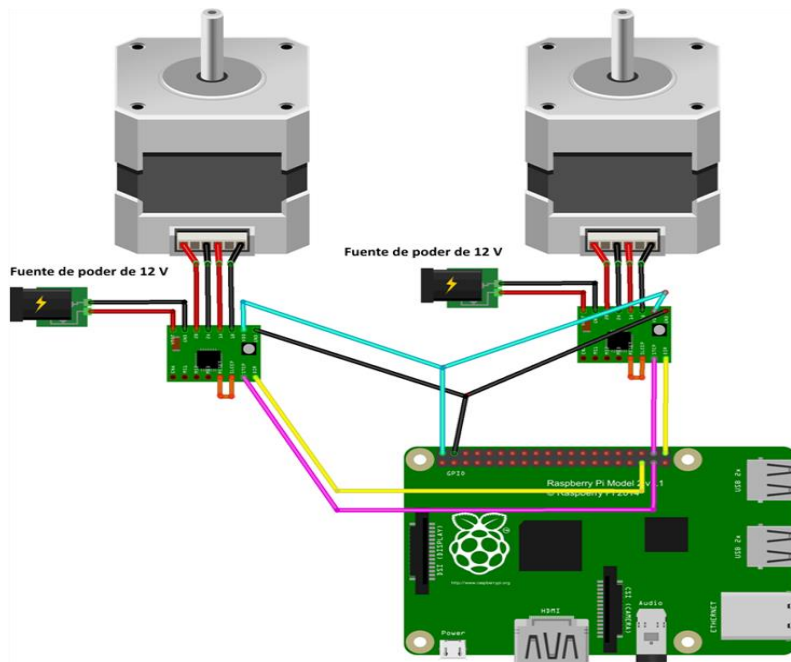


Figura 10 motores controlados por raspberry pi [33]

Clasificación por el lazo de control

El control del sistema en una máquina CNC se realiza de dos formas:

- En lazo abierto
- En lazo cerrado

Sistema de lazo abierto: Este tipo de sistema no tiene forma de saber el resultado de un proceso en tiempo real, es decir, no tiene una retroalimentación en su sistema, por lo tanto, no tiene forma de saber si la orden dada por la máquina fue ejecutada correctamente y no puede tomar medidas correctivas en caso de algún error, ocasionando imprecisión. Este sistema se aplica normalmente sólo al caso en donde la salida es casi constante y predecible. Por lo tanto, el sistema de lazo abierto no suele ser utilizado en las máquinas herramientas

industriales, puesto que la fuerza de corte y la carga de una máquina herramienta nunca es una constante [34].



Figura 11 diagrama de bloques de sistema de lazo abierto [35]

Sistema de lazo cerrado: En un sistema de lazo cerrado existen dispositivos de retroalimentación que monitorean de cerca el resultado generado por una orden de la máquina y cualquier error en el resultado es corregido inmediatamente. Por lo tanto, se puede lograr una alta precisión. Este sistema es más potente que el sistema de lazo abierto y puede aplicarse al caso en el que la salida está sometida a cambios frecuentes. Hoy en día, casi todas las máquinas CNC industriales utilizan este sistema de control [34].

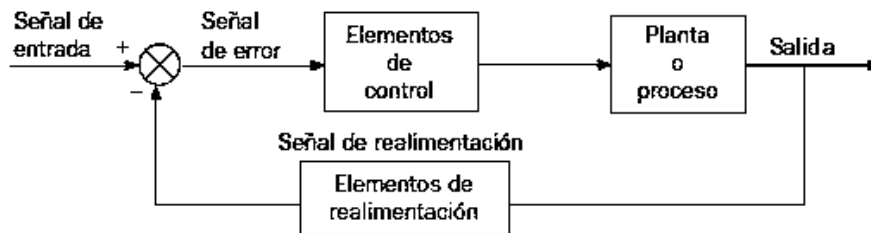


Figura 12 diagrama de bloques de sistema de lazo cerrado [36]

Un ejemplo de máquinas CNC con sistemas de lazo abierto podría ser que la mesa de trabajo tiende a sobrepasar o no alcanzar la posición deseada debido a cambios de la inercia, desgastes y/o fricción, mientras que, en máquinas CNC con sistemas lazo cerrado, los sensores de posición permiten corregir el movimiento de la mesa y conseguir una mayor precisión y repetitividad [37].

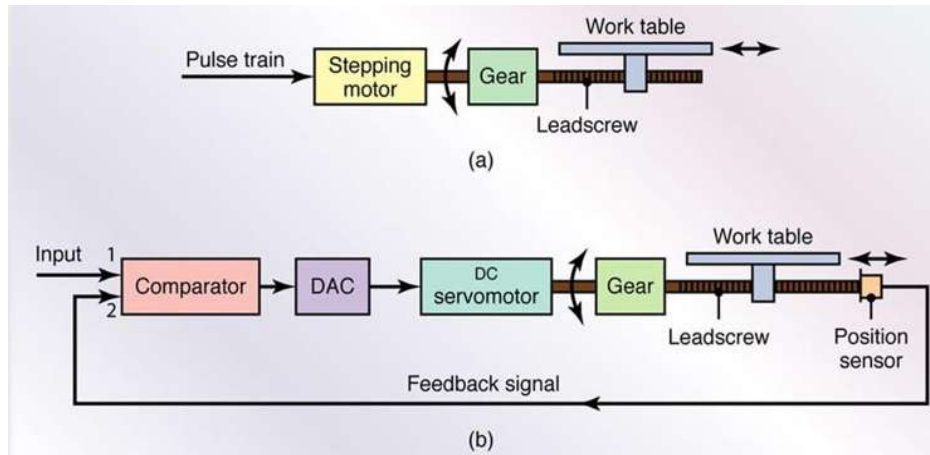


Figura 12 sistemas de control a) lazo abierto b) lazo cerrado del ejemplo [37]

Clasificación por el control de las trayectorias

Esta clasificación podría ser una de las más importantes ya que las máquinas CNC se diferencian en función del trabajo que realizan, basándose en las trayectorias de mecanizado.

La clasificación basada en las trayectorias se divide como:

- Control punto a punto
- Máquinas de control pariaxial
- Control interpolar o continuo [38].

Máquinas de control punto a punto

Este tipo de máquinas puede mecanizar solo los puntos iniciales y finales, pero no la trayectoria. Además, no puede controlar los parámetros como el trazado y la velocidad [39]. Casos típicos de estos sistemas son las máquinas de montaje automático y perforadoras.

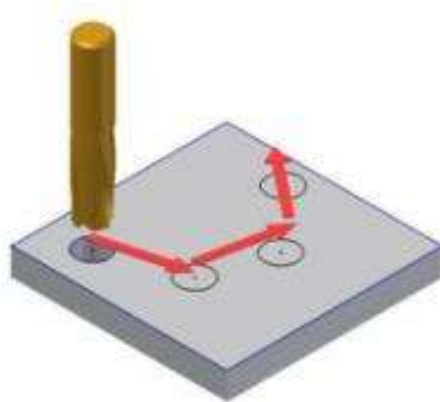


Figura 14 control punto a punto [40]

Máquinas de control pariaxial

A diferencia de las máquinas punto a punto en este tipo de máquinas se permite programar los desplazamientos y la velocidad a lo largo de toda la trayectoria. Tienen la capacidad de controlar movimientos paralelos a los ejes de coordenadas, pero no en forma simultánea y por lo tanto no son posibles movimientos angulares lo que puede resultar como un inconveniente en este tipo de máquinas. Ejemplo de estos sistemas son las sierras circulares y los sistemas de corte con discos en general [39].

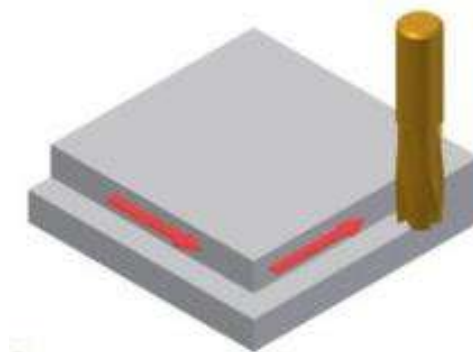


Figura 15 control pariaxial [40]

Máquinas de control interpolar o continuo

Interpolar se entiende por el movimiento simultaneo de 3 o más ejes de forma controlada, realizando trayectorias perfectamente definidas tanto lineales como curvas [40].

En este tipo de máquinas es posible controlar la posición y la velocidad en los tres ejes de forma simultánea, como, por ejemplo, la herramienta que funciona al mismo tiempo que se desplaza a lo largo de una trayectoria predefinida. Además, utiliza el grado más complejo de control de movimiento, ya que son importantes el control y la sincronización de las velocidades y movimientos en los diferentes ejes.

Las máquinas de control interpolar o continuo son las más utilizadas debido a que tienen varias funciones para poder desempeñar diferentes actividades en cuanto al mecanizado [41].

Ejemplos de estas, son máquinas de soldadura automática, de corte de plasma, laser, fresadoras, impresoras 3D, etc. [39].

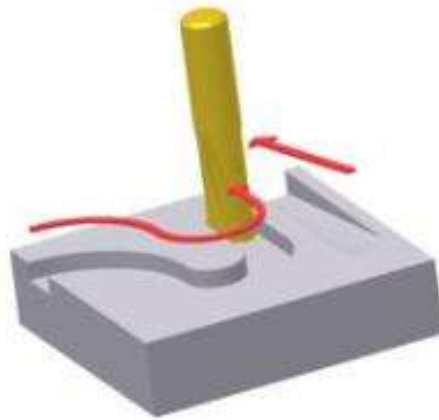


Figura 16 control interpolar o continuo [40]

Clasificación por la tecnología de control

La clasificación de los controles numéricos (CN) se divide según la forma física de los controles, los cuales se fueron desarrollando conforme a la tecnología; dicha clasificación es:

- Control Numérico (CN)
- Control Numérico Computarizado (CNC)
- Control Numérico Adaptativo (CNA)

Control Numérico (CN)

La denominación de Control Numérico (CN) se utiliza para nombrar aquellos controles donde cada una de las funciones se realizaban e implementaban por un circuito electrónico

específico únicamente destinado a este fin, realizándose la interconexión entre ellos con lógica cableada.

Las características principales de estos controles son las de trabajar sin memoria, con una cinta perforada como medio de introducción del programa el cual se ejecutaba de forma secuencial [18].

Control Numérico computarizado (CNC)

Los circuitos de lógica cableada de los sistemas CN se sustituyeron al usar uno o varios microprocesadores, dando lugar a los Controles Numéricos Computarizados (CNC), los cuales fueron aumentando el grado de fiabilidad del control y permitiendo su instalación en espacios reducidos y con un nivel de ruido elevado [18].

Los CNC incluyen una memoria interna que permite el almacenamiento y ajustes del programa, como lo son los datos de la máquina y las compensaciones de las herramientas, Además de incorporar un teclado que facilita la comunicación y el grado de interactividad.

Actualmente, todos los controles que se fabrican son del tipo CNC, quedando reservado el término CN (Control Numérico) para referirse a esta tecnología.

Control Numérico Adaptativo (CNA):

El Control Numérico Adaptativo (CNA) es la tendencia actual de los controles, en ellos el controlador detecta las características del mecanizado que está realizando y en función de ellas optimiza las velocidades de corte y los avances; en otras palabras, adapta las condiciones teóricas o programadas del mecanizado a las características reales del mismo.

Para ello, hace uso de sistemas sensoriales de fuerza y deformación en la herramienta como son el par, temperatura de corte, vibraciones, potencia, etc.

Capítulo 3 Hardware CNC disponible y diseñado

En este capítulo se explica el hardware de la máquina CNC reutilizado, haciendo énfasis en las placas de control que permite el funcionamiento de la máquina, así como el hardware adaptado y diseñado requerido para este trabajo: unidad de control o controlador, interruptores de paro, herramienta de trabajo (husillo), filtros pasa bajas, base de la herramienta de trabajo y un sistema de autonivelación en superficies conductoras.

3.1 Hardware reutilizado

Después de realizar una inspección visual, se determina que varias piezas de la máquina se encuentran en buenas condiciones lo que hace posible reutilizar cierto hardware como el encargado del movimiento y el hardware de control.

3.1.1 Hardware de movimiento

Motores de pasos

El accionamiento de la máquina CNC es de tipo eléctrico ya que posee motores de pasos para el movimiento de sus ejes, haciendo posible realizar trabajos donde se requieren movimientos muy precisos, debido a su movimiento de un paso a la vez por cada pulso que sea aplicado.

Los motores de pasos para el movimiento de los ejes de la máquina CNC son motores GREEN MONSTER 420 OZ modelo HT23-420-8 de la empresa PROBOTIX®.

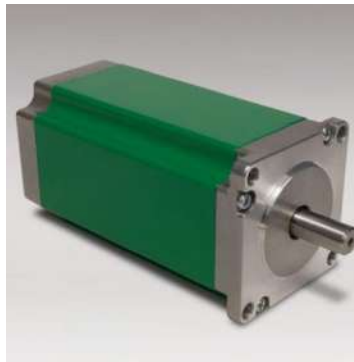


Figura 13 motor de pasos de máquina CNC [43]

Este motor de pasos es un motor NEMA23 con diseño híbrido, el cual presenta 200 pasos por revolución y con un eje de 3/8". Es un motor de pasos unipolar de 8 hilos o cables, debido

a que contiene 4 bobinas en su interior, dando facilidad de obtener diferentes conexiones con estas [44].

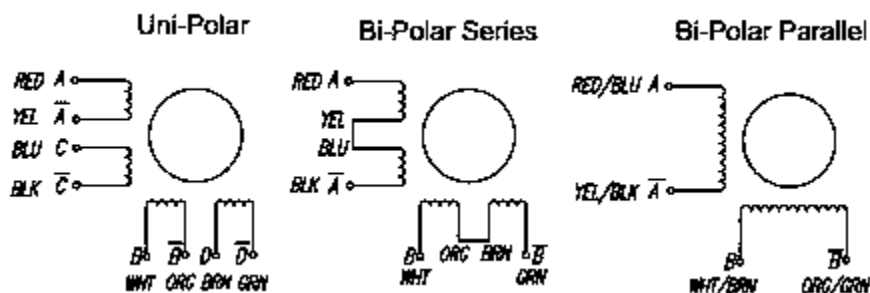


Figura 14 conexión de las bobinas del motor de pasos de la máquina CNC [44]

Dependiendo de su conexión se tendrán diferentes características como se puede observar en la siguiente tabla:

Descripción	Unipolar	Serie	Paralela
Par de retención (Nm $\pm 10\%$)	215 N.cm Min	300 N.cm Min	300 N.cm Min
Corriente nominal (amperios / fase)	3	2.1	4.2, 4.2
Resistencia (ohm / fase + - 10%)	1.6	3.2	0.8
Inductancia (mH / fase + - 20%)	3.8	15.2	3.8
Inercia del rotor (g.cm ²)	800	800	800
Longitud del motor	154 mm / 6"	154 mm / 6"	154 mm / 6"
Peso del motor	1.8kg / 4lbs	1.8kg / 4lbs	1.8kg / 4lbs
Numero de alambres	8	8	8
Tamaño del eje	3/8" desde 1/4" atrás	3/8" desde 1/4" atrás	3/8" desde 1/4" atrás

Tabla 3 características del tipo de conexión de motor de pasos [44]

3.1.2 Hardware de control

La máquina CNC cuenta con placas electrónicas de control las cuales hacen posible la generación de los movimientos de los ejes de la máquina (X, Y, Z), así como la activación de accesorios.

Estas placas corresponden a los drivers de los motores paso a paso (3 placas electrónicas), una placa que controla el accionamiento de accesorios que contenga la máquina CNC (como la herramienta de trabajo), y, por último, una placa de comunicación, que transmite las órdenes a las placas anteriores (drivers y accesorios), la cual contiene una entrada con puerto paralelo.

Las placas electrónicas que contienen los drivers de los motores paso a paso, son placas electrónicas denominadas **ProboStep** de la empresa PROBOTIX®.



Figura 15 placa con driver de motor de pasos [43]

La placa electrónica **ProboStep** es un controlador diseñado para operar motores paso a paso unipolares en modos de paso completo, medio, cuarto, octavo y decimosexto con capacidad de salida de 44 volts a 3.0 amperes. Utiliza un chip Sanken SLA7078MPR que incluye la protección contra cortocircuito o circuito abierto de carga proporcionando una menor pérdida y menor resistencia térmica [43].

Características:

- Límite de corriente ajustable por potenciómetro
- Amplio rango de voltaje del motor (10V - 42V)
- LED indicador de encendido (para lógica)
- Salida de 3A a 44V
- Circuito de supresión de PWM
- Rango de voltaje lógico de 3.0 - 5.5V
- Rectificación para baja disipación de energía
- Protección de cortocircuito y circuito abierto
- Protección de corriente cruzada

Esta placa utiliza un conector de desplazamiento de aislamiento (IDC), para las señales lógicas lo que permite el uso de un cable con este tipo de conector (IDC) para conectar las demás placas.

Este conector presenta muchos pines conectados a tierra, esto es para eliminar el ruido electromagnético que puede generar la placa, ya que dicho ruido puede provocar pasos en falso y dañar el equipo, o la pieza.

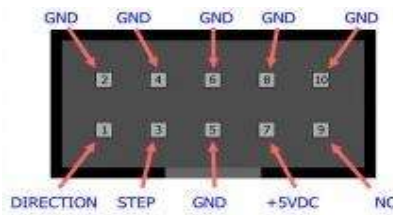


Figura 16 conector IDC para el driver de motor paso a paso [43]

A continuación, se presenta el esquema de la tarjeta, en el cual se observa las posibles conexiones cuando los motores son unipolares de 6 u 8 cables.

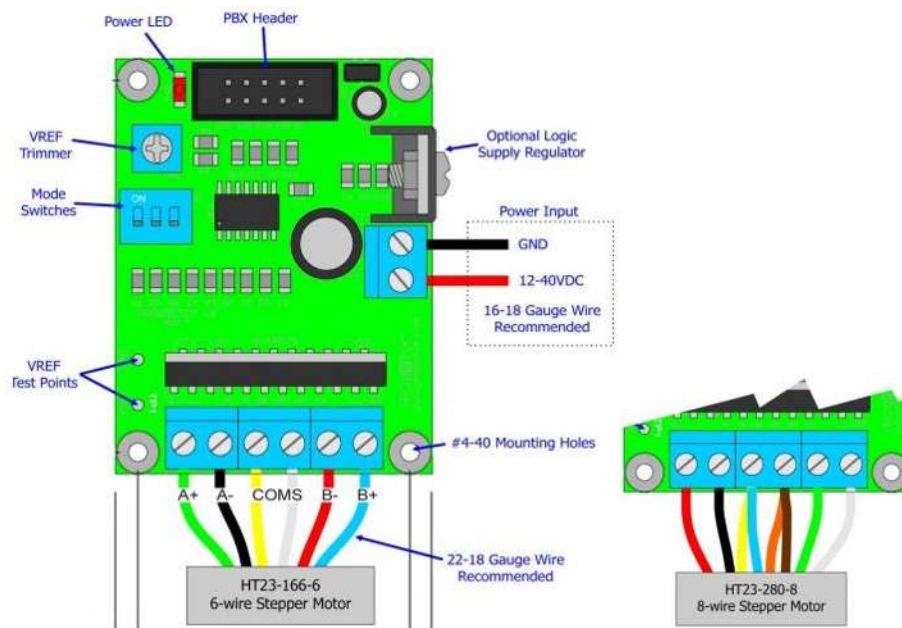


Figura 17 diagrama para motor paso a paso de 6 y 8 cables [43]

La placa que controla los drivers de los motores y los accesorios de la máquina CNC es la PBX-RF de la empresa PROBOTIX®.

Es una placa de conexión de puerto paralelo aislado, es decir, que posee chips de aislamiento los cuales funcionan de manera similar a los optoaisladores, excepto que usan ondas de radio para enviar señales a través del plano de aislamiento en lugar de luz.

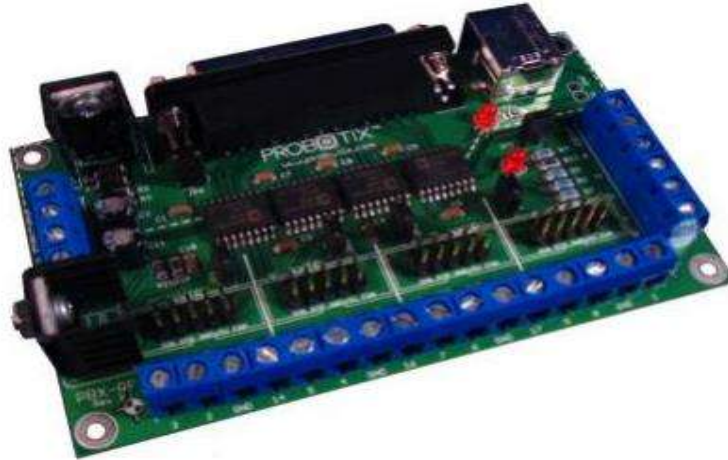


Figura 18 placa para el control de drivers y accesorios [43]

Estas ondas de radio se producen mediante bobinas de transmisión y recepción a las cuales se les ingresa los pulsos eléctricos de las entradas del chip y que, con ayuda de codificadores y decodificadores contenidos dentro de él, hacen posible este tipo de aislamiento para la protección de cualquier daño potencial (picos o cortocircuitos en controladores de motores de alto voltaje utilizados en CNC) que llegue a ocurrir en la parte de control.

El puerto paralelo contiene 17 señales disponibles para que se pueda acceder a cada una de ellas, de las cuales 12 están disponibles como salidas para controlar motores, relés u otros dispositivos, y 5 las cuales se configuran como entradas usadas típicamente para límite de interruptores, sondas táctiles e interruptores de parada de emergencia.

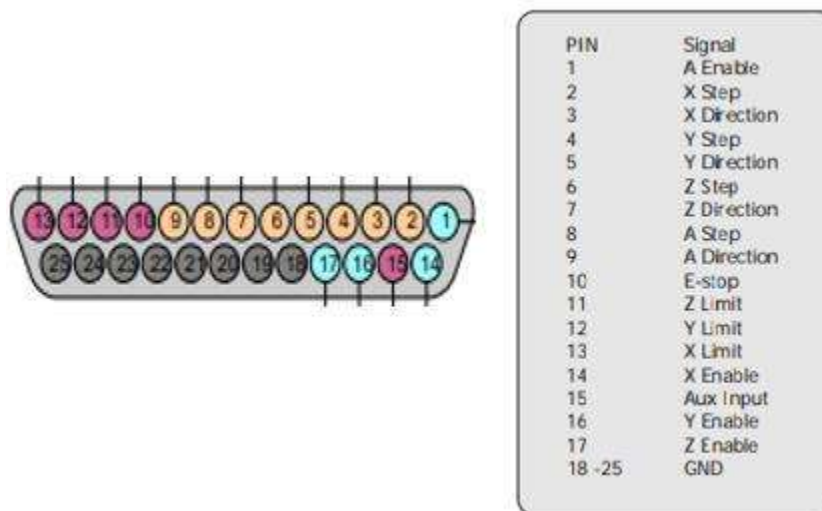


Figura 19 pines del puerto paralelo [43]

La placa utiliza conectores de desplazamiento de aislamiento (IDC) estándar para conectarse fácilmente a los controladores (drivers) de los motores y otros periféricos. En la siguiente figura se puede ver las patillas de estos conectores:

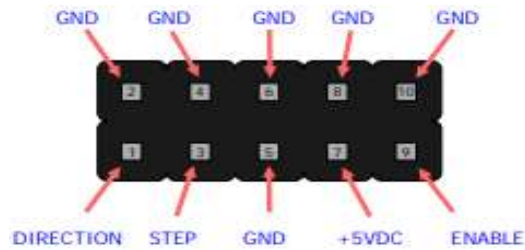


Figura 20 patillas de conectores IDC [43]

La placa para la activación de accesorios de la máquina CNC es la RBX-1 también de la empresa PROBOTIX®.



Figura 21 placa para accesorios de CNC [43]

Es una placa electrónica de relé optoaislada de tres canales utilizada para activar dispositivos de alto voltaje como el husillo (herramienta de trabajo), bombas de refrigerante y aspiradoras, desde el software de control CNC y archivos de código G.

Cada relé tiene capacidad para 12 amperios a 120 VCA (o 6 amperios a 240 VCA). Además de funcionar en conjunto con LEDs para indicar cuándo están activados.

Los optoaisladores que accionan los relés son de tierra común y se activan con una alimentación de +5 Vcd.

La siguiente figura muestra la conexión de la placa de relés al utilizarla:

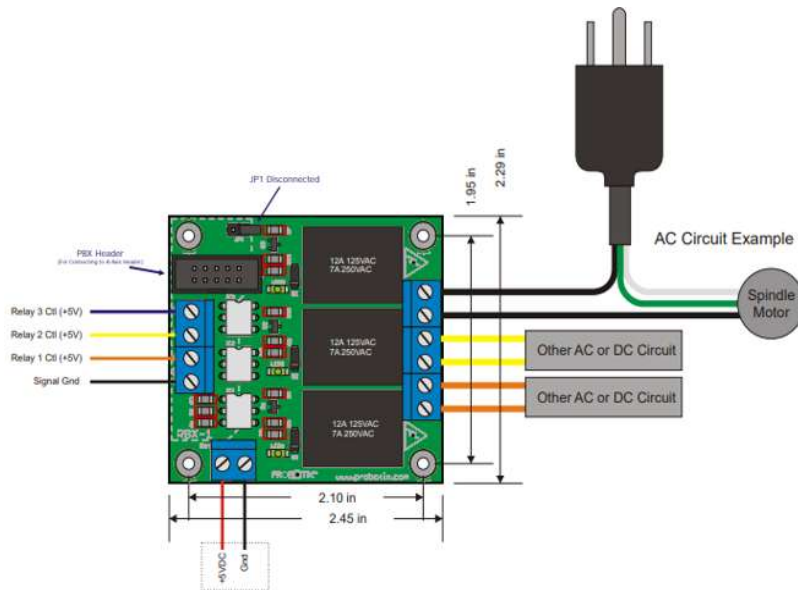


Figura 22 conexión de placa de relés [43]

La placa de relés incluye un conector IDC para poder controlar los mismos mediante la placa de control de movimiento de los motores solamente conectando el jumper “JP1” junto con un cable de conexión a tierra que elimina la necesidad de una fuente de alimentación de 5V externa como se muestra en la siguiente figura:

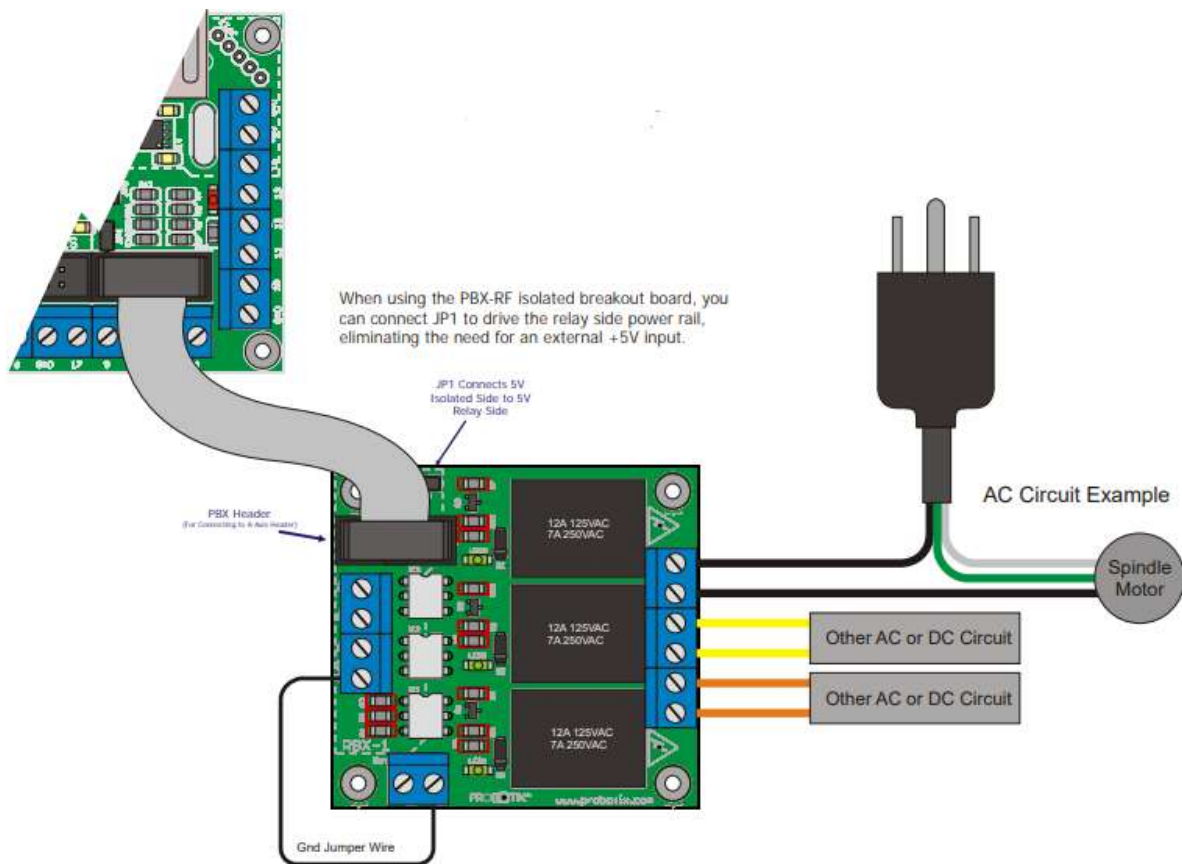


Figura 23 conexión de placa de relés con la placa de control de motores [43]

Las 3 placas electrónicas mencionadas anteriormente son el hardware disponible en la máquina CNC, las cuales son usadas para controlar los movimientos de sus motores y accionamiento de accesorios que pueda tener.

3.1.3 Hardware de límite

Como método de seguridad de la máquina posee unos micro interruptores denominados interruptores de limite. Estos interruptores se encuentran en los 3 ejes (X, Y, Z) y su función es que, al ser activados estos interruptores, mandan una señal eléctrica al controlador para detener el movimiento de la máquina sea cual sea la acción que se esté ejecutando en ese momento.

Los micro interruptores que se usan como interruptores de límite son del modelo KW3-OZ.



Son interruptores que poseen 2 modos de operación dependiendo su conexión, normalmente abiertos (NO) o normalmente cerrados (NC). Teniendo como características eléctricas: un máximo de 16A a 125/250VAC. Además de funcionamiento con voltaje directo (CD), como el utilizado en la máquina CNC de este trabajo.

Botón de emergencia

Es un botón de paro emergente para bloquear la máquina en algún error en el manejo por parte del operador.

Este botón de paro emergente es un interruptor modelo Cutler Hammer E22B1 del fabricante EATON®, el cual tiene una configuración de normalmente cerrado (NC) y cuyas características son el soportar una corriente máxima de 10A, así como un voltaje máximo de 600V en voltaje alterno (CA) y en voltaje directo (CD).



Figura 25 interruptor del botón emergente en máquina CNC [48]

3.2 Hardware adicional

Una vez revisado el hardware y después de haber determinado cual será reutilizado, se contempla el hardware adicional para el correcto uso de la máquina.

Unidad de control (MCU Arduino)

La unidad de control o controlador que se utilizó fue gracias a que cumplía con los requisitos necesarios como el interpretar un programa CNC accionando una serie de comandos, señales para la máquina como el control del movimiento de los ejes y el poder de leer ciertas entradas importantes del operador, tales como switches de paro y/o botones de emergencia.

El dispositivo utilizado como controlador en este trabajo es el Arduino UNO, es una placa de microcontrolador de código abierto basado en el microchip ATmega328P y desarrollado por la compañía Arduino®.



Figura 26 placa arduino UNO [44]

Es una placa equipada con un conjunto de pines de E/S digitales de los cuales algunos pueden ser utilizados para salidas PWM o conectarse a varias placas de expansión y otros circuitos, contiene 6 entradas analógicas, una velocidad del reloj de 16 MHz, memoria Flash de 32 KB de los cuales 0.5 KB es usado por Bootloader, SRAM de 2 KB y una EEPROM de 1 KB, un conector para USB tipo B hembra, un Jack para fuente de Poder, un conector ICSP y un botón reset.

La placa de microcontrolador tiene la suficiente capacidad de procesamiento y almacenamiento lo que permite la conexión con el hardware disponible de la máquina CNC, así como obtener señales de entrada o enviar señales a un actuador de tal manera que es posible usarlo como controlador de la máquina CNC.

Herramienta de trabajo (husillo)

La herramienta disponible (husillo) para la fabricación de diseños creados por el operador de la máquina CNC es un motor de CD, el cual se muestra a continuación:



Figura 27 husillo de máquina CNC [45]

Las especificaciones de dicho motor son las siguientes:

- Tensión de funcionamiento: 100VDC
- Potencia: 500 W
- Velocidad: Hasta 12,000 rev/min
- Par: 5000 G/cm
- Resistencia de aislamiento: $> 2 \text{ M}\Omega$
- Resistencia dieléctrica: 400 V
- Diámetro: 52mm
- Husillo de alta precisión: 0.01-0.03mm.

Interruptores de límite (adicionales)

Para mayor seguridad en el movimiento de la máquina, se adaptaron 3 límites de paro más en cada eje (X, Y, Z), teniendo así 2 límites de paro en cada eje, es decir, 2 límites de paro en el eje X, 2 límites en el eje Y y 2 en el eje Z. Esto como medida por un mal manejo de la máquina CNC por el operador.

Los interruptores que contienen estos límites de paro adaptados son modelo MSW-0 de la marca Siemens®, que tienen como característica el soportar una corriente de 10A y de funcionar con voltaje directo lo cual es ideal para usarlo como límite de paro en la máquina CNC.



Figura 28 interruptor adaptado en máquina CNC [47]

Eliminación de ruido electromagnético (Filtros)

Debido a las modificaciones necesarias de la máquina CNC como la herramienta de trabajo, interruptores de límite entre otros, se requiere diseñar hardware para para el correcto uso y operación del usuario. Este hardware diseñado se menciona a continuación.

El accionamiento de la máquina CNC cuenta con motores paso a paso los cuales generan demasiado ruido electromagnético ocasionando que ciertas señales de entrada del controlador sean leídas incorrectamente ocasionando que en el software de la máquina CNC aparezca una alarma la cual no permite el movimiento de la máquina.

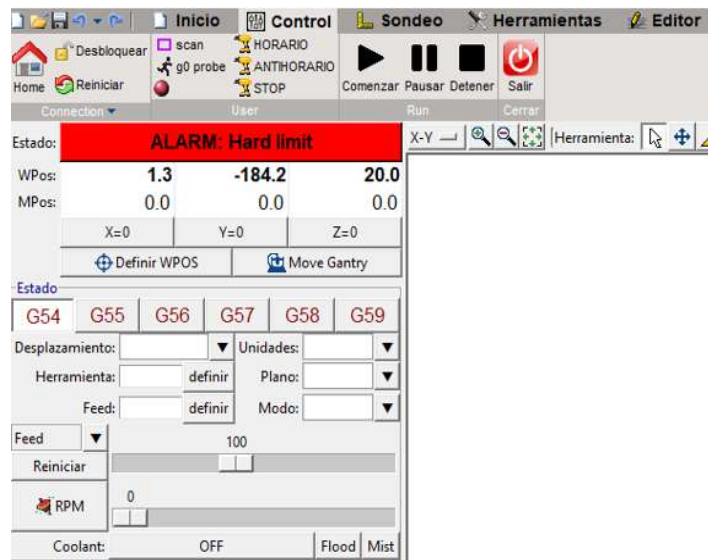


Figura 29 alerta en el software de la máquina CNC

Estas señales de entrada mencionadas son los interruptores de límite y por el sistema de escaneo de superficies conductoras (sonda) que contiene la máquina CNC.

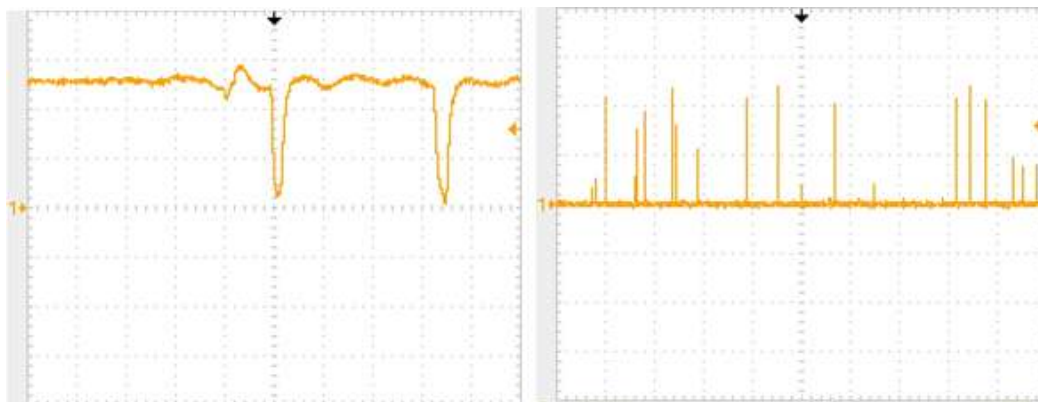


Figura 30 señales de entrada con ruido electromagnético

La solución para eliminar este problema (ruido electromagnético) generado por los motores de pasos, y poder leer correctamente las entradas del controlador de la máquina, es el diseño de filtros pasa bajas pasivos de 1er orden.

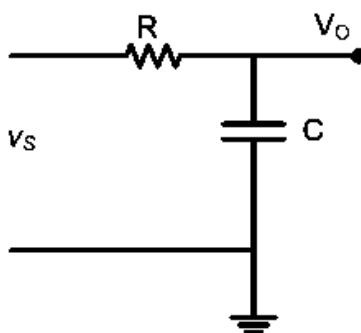


Figura 31 esquema de filtro pasa bajas pasivo de 1er orden [3].

Un filtro pasa bajas pasivo de 1er orden está compuesto por un condensador y una resistencia y solo permite el paso de frecuencias bajas y atenúa las frecuencias altas. Se conoce como pasivo porque solo está compuesto por elementos pasivos, y de primer orden porque solo contiene un elemento reactivo (un condensador).

Realizado el filtro se pasa a visualizar las señales de entrada (paros de limite y sonda) para observar el cambio que existe del ruido electromagnético en las entradas.

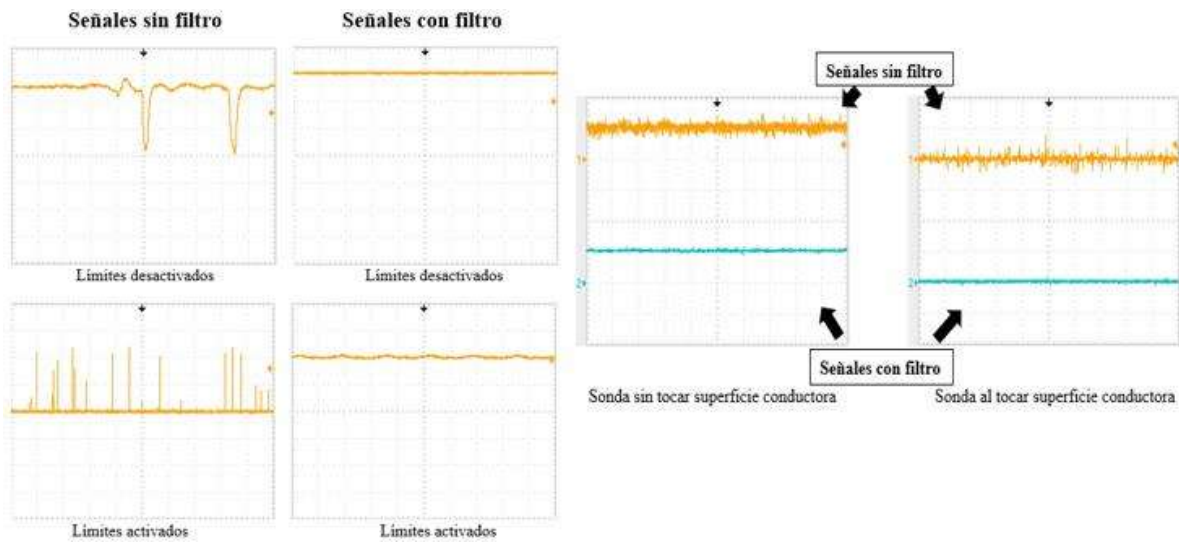


Figura 32 señales de entrada con y sin el filtro

Base de la herramienta de trabajo

La base para el soporte del husillo en la máquina CNC fue diseñada y creada mediante el uso del software Fusion 360 de la compañía Autodesk® y el software Cura de la empresa Ultimaker®.



Figura 33 logo del software Fusion 360 [51]

Fusion 360 es un software para el diseño de productos, es una herramienta CAD / CAM 3D basada en la nube que combina diseño industrial y mecánico, colaboración y mecanizado en un solo paquete.

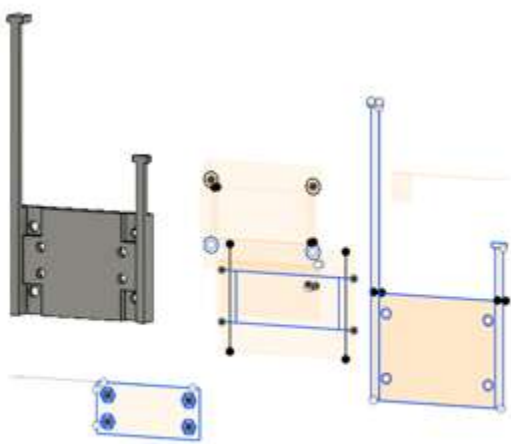
Cura es una aplicación diseñada para impresoras 3D, en la que se pueden modificar los parámetros de impresión y después transformarlos a código G.



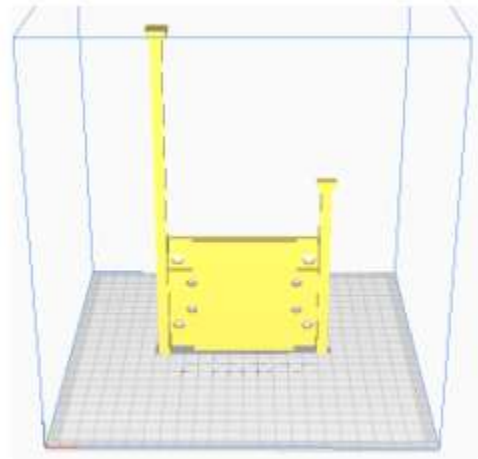
Figura 34 logo del software Cura [52]

Mediante el uso de estos 2 programas, se diseña y se imprime la base de la herramienta de la máquina CNC (husillo).

Como primer paso, se diseña la base con el software Fusion 360; como siguiente paso fue crear el modelo 3D de la base en Cura para posteriormente hacer la impresión en 3D.



Base diseñada en Fusion 360



Base creada en Cura

Figura 35 base de husillo diseñada y creada

Sistema de auto-nivelado en superficies conductoras

Debido a algunos inconvenientes de la máquina CNC como ligeras deformaciones en la mesa de trabajo, así como las propias deformaciones que contienen las superficies a trabajar, son motivo de malos trabajos realizados en superficies conductoras ya que no existe un nivel específico con el que se pueda trabajar.

Una posible solución es la creación de un sistema de auto-nivelado que permita detectar y corregir las deformaciones para la correcta fabricación de diseños realizados en superficies conductoras.

Este sistema se basa en el escaneo de las superficies conductoras donde se va a trabajar, haciendo una medición de las diferentes alturas que se producen por las deformaciones que contienen las superficies. Este proceso también es llamado “sondeo”.

Los componentes físicos del sistema de auto-nivelado consisten en 2 cables los cuales entre ellos hay una diferencia de potencial igual a +5V CC y con ayuda de 2 caimanes un cable se conecta a la punta del husillo y el otro cable se conecta a una parte de la superficie conductora provocando que entre la punta del husillo y la superficie conductora exista esta diferencia de potencial (+5V CC).

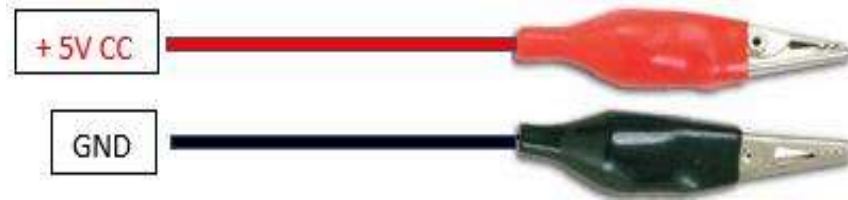


Figura 36 componentes de auto-nivelado

Con la ayuda del controlador y el software de la máquina CNC se realiza el escaneo en el área de trabajo de la superficie conductora mediante el contacto físico que hay entre la punta del husillo y de cada deformación existente en la superficie conductora haciendo que haya una diferencia de potencial de +5V CC cuando no están en contacto y de 0 Vcd cuando se encuentren en contacto, generando datos en cada contacto físico que se provoca.

Con ayuda del software de la máquina estos datos generados son procesados y almacenados para seguidamente ser utilizados en las correcciones en el proceso de fabricación.



Figura 37 prueba de auto-nivelado

Capítulo 4 Software utilizado

En este capítulo se describen los programas tanto del controlador de la máquina CNC, como del utilizado en la computadora para la fabricación de circuitos impresos o PCBs.

Se comienza describiendo el programa cargado en el controlador, para seguir con el programa utilizado en la máquina CNC y finalmente describir el programa para la fabricación de placas de circuito impreso (PCB).

4.1 Software del controlador

El software con el cual opera el controlador de la máquina CNC se denomina grbl®.



Figura 38 logo del software grbl [50]

Grbl es un software gratuito, de código abierto, de alto rendimiento, basado en puerto paralelo que se ejecuta en un Arduino, escrito en C altamente optimizado capaz de mantener hasta 30 kHz de pulsos de control estables y sin fluctuaciones. Es utilizado para fresado CNC.

Tiene la ventaja de aceptar código G, permitiendo el movimiento helicoidal, arcos, círculos, así como todos los demás comandos de código G primarios. Además, visualiza los próximos 18 movimientos a ejecutar con lo que le permite planificar sus velocidades con anticipación para ofrecer una aceleración suave y curvas sin sacudidas.

Al momento de realizar esta tesis, el controlador posee la versión v0.9j la cual nos permite interconectar nuestro hardware con el microcontrolador, además de poder modificar algunas de sus características adecuándolo a nuestras necesidades.

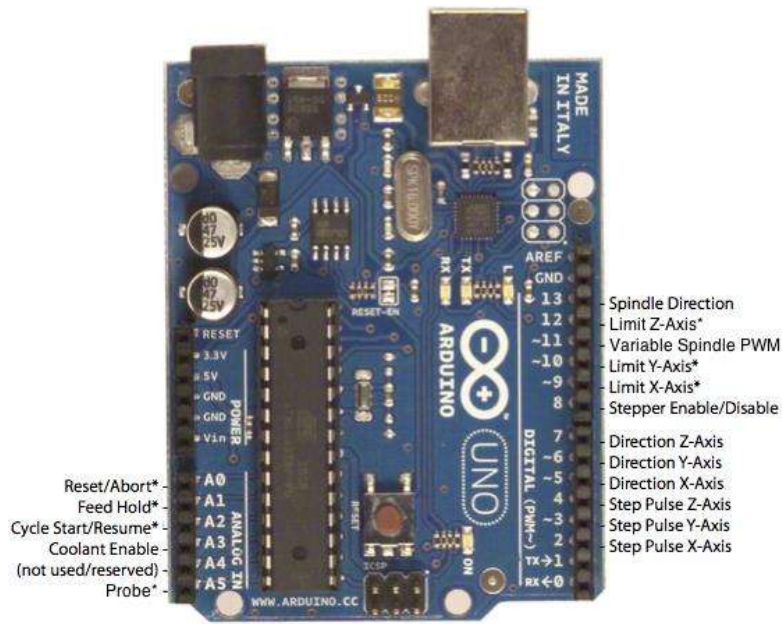


Figura 39 pines del controlador con grbl v0.9 [51]

Como se mencionó anteriormente el controlador interpreta los comandos G y M para realizar las acciones correspondientes como el control de los motores, accionamiento de accesorios, lecturas de entradas, etc. El software del controlador solamente permite los comandos G y M que se muestran en las siguientes tablas:

G00	Posicionamiento rápido (sin maquinar)	G40	Cancela cualquier compensación aplicada durante el programa y actúa como seguridad para cancelar cualquier compensación aplicado por programas previos.
G01	Interpolación lineal (maquinando)	G43.1	Cambia los movimientos subsiguientes reemplazando los desplazamientos actuales de los ejes
G02	Interpolación circular (horaria)	G49	Cancela compensación longitudinal del cortador
G03	Interpolación circular (antihoraria)	G53	Movimiento en coordenadas absolutas
G04	Temporización	G54	Selecciona el sistema de coordenadas 1
G10	Ajuste del valor de offset del programa	G55	Selecciona el sistema de coordenadas 2
G17	Plano principal XY, y eje longitudinal Z	G56	Selecciona el sistema de coordenadas 3
G18	Plano principal XZ, y eje longitudinal Y	G57	Selecciona el sistema de coordenadas 4
G19	Plano principal YZ, y eje longitudinal X	G58	Selecciona el sistema de coordenadas 5
G20	Unidades imperiales (pulgadas)	G59	Selecciona el sistema de coordenadas 6
G21	Unidades métricas (milímetros)	G61	Visita el punto programado exactamente
G28	Traslada automáticamente la herramienta a la posición de retorno cero predefinida	G80	Cancela cualquier ciclo de taladrado que se haya programado anteriormente
G28.1	Almacena la posición absoluta actual en los parámetros X, Y, Z, A, B, C, U, V y W	G90	Comando para hacer uso de coordenadas absolutas
G30	Preselección del origen polar	G91	Comando para hacer uso de coordenadas incrementales (relativas)
G30.1	Almacena la posición absoluta actual en los parámetros	G91.1	Modo de distancia incremental para las compensaciones I, J y K

G38.2	Sonda hacia la pieza de trabajo, parada en contacto, señal de error si falla	G92	Programación del punto cero absoluto, o cero de pieza
G38.3	Sonda hacia la pieza de trabajo, parada en contacto	G92.1	Borra las compensaciones del sistema de coordenadas
G38.4	Sonda alejada de la pieza de trabajo, parada en caso de pérdida de contacto, señal de error si falla	G93	Modo de tiempo inverso
G38.5	Sonda lejos de la pieza de trabajo, parada en caso de pérdida de contacto	G94	Unidades por modo de minuto

Tabla 4 comandos G aceptados en el controlador [4]

Los comandos misceláneos aceptados por el controlador son:

M0	Parada opcional
M2	Concluye ejecución del programa
M3	Giro del husillo (horario)
M4	Giro del husillo (antihorario)
M5	Parada de husillo
M8	Encendido del refrigerante
M9	Apagado del refrigerante
M30	Finaliza el programa

Tabla 5 comandos M aceptados en el controlador [4]

Los comandos G y M que acepta el controlador son suficientes para el control de la máquina CNC logrando dar un amplio rango de opciones de trabajo que puede escoger el operador para su respectiva interacción con la máquina.

4.2 software de la máquina CNC

En esta parte se habla del software cargado en la computadora la cual permite la conexión con el controlador para así obtener el control de la máquina CNC.

El software cargado en la computadora es el software bCNC el cual es entre otras cosas un remitente de comandos grbl, un autonivelador, editor de código G, digitalizador y CAM [53]. Se dice que es remitente de comandos grbl debido a que envía los comandos dentro del código G al controlador por medio del puerto serial. Es robusto y rápido, capaz de funcionar bien con hardware antiguo o lento. Además, de ser un programa multiplataforma (Windows, Linux, Mac) escrito en Python.

bCNC es el software encargado del control de la máquina CNC gracias a todas las características que contiene lo que permite, visualizar, editar y monitorear correctamente los movimientos y las acciones que realiza la máquina.

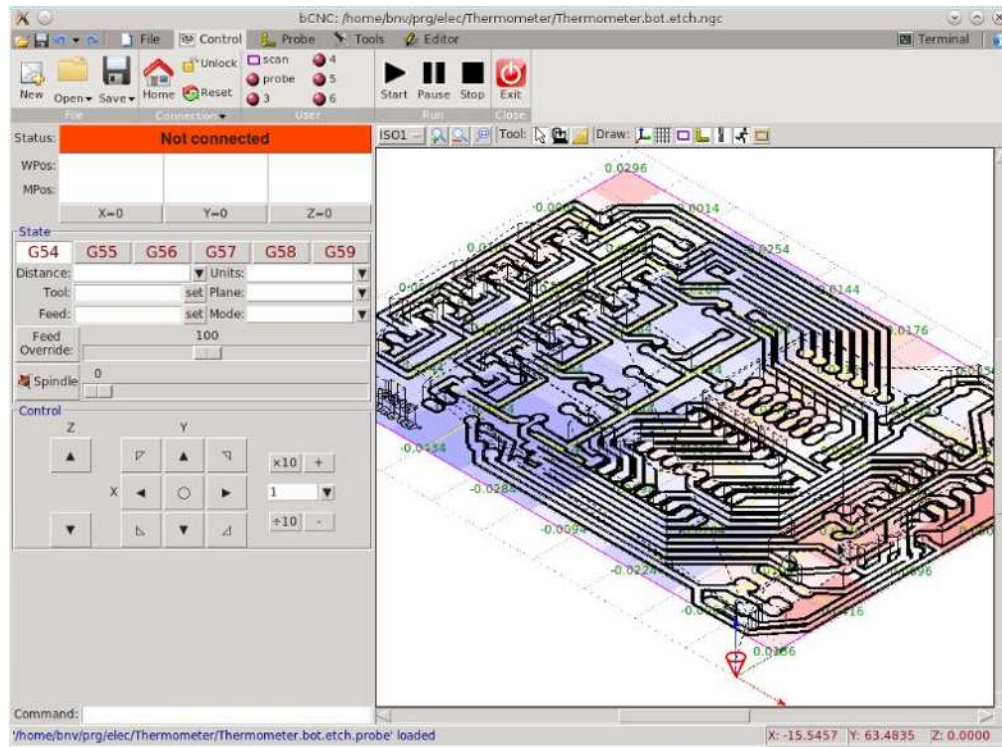


Figura 40 software bCNC [53]

Las características del software bCNC son:

- Interfaz simple e intuitiva para pantallas pequeñas
- Importar / exportar archivos g-code, dxf y svg
- Malla 3D que corta archivos stl y pliegues
- Remitente de código g
- Configuración del espacio de trabajo (comandos G54, G59)
- Botones configurables por el usuario
- Evaluación de la función del código g con expansión de tiempo de ejecución
- Anulación de alimentación durante la ejecución para un ajuste fino
- Sondeo fácil:
 - sondeo simple
 - buscador central con un anillo de sondeo
 - nivelación automática, sondeo Z y nivelación automática modificando el código g durante el envío (o nivelando automáticamente el archivo de código g).

- visualización del mapa de color de altura
- creador de código g tratando y grabando puntos
- expansión manual de cambio de herramienta y sondeo automático de longitud de herramienta
- expansión de ciclos fijos
- Varias herramientas:
 - base de datos configurable por el usuario de materiales
 - base de datos de propiedades de materiales
 - características básicas de CAM (perfilado, embolsado, perforación, corte plano / helicoidal / en rampa, fresado de roscas, pestañas de corte, cuchilla de arrastre)
 - complementos de código g de usuario:
 - generador de cuenco
 - generador de caja de articulación de dedo
 - simple generador de engranajes rectos
 - generador de espirógrafo (diseños geométricos)
 - aplanar la superficie
 - reproducir melodía desde un archivo MIDI usando la frecuencia del motor paso a paso
- Editor de código G y pantalla
 - visualización gráfica del código g y espacio de trabajo (mover y editar gráficamente el código g)
 - reordenación de código y optimización de movimiento rápido moviéndose, girando, reflejando el código g
- Colgante web para ser utilizado a través de teléfonos inteligentes

A continuación, se describe de forma concreta el uso del mismo:

- **Pestaña Inicio:** Entre sus principales características está la **pestaña Inicio (File)** ya que en esta se muestra la información del controlador.

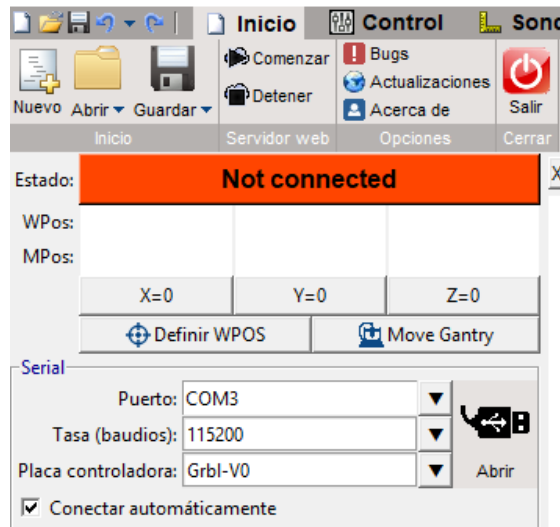


Figura 41 pestaña Inicio en bCNC [54]

En esta pestaña se encuentra la configuración de la conexión del controlador de la máquina, la selección el puerto serie donde está conectado, y la velocidad de comunicación o baudrate.

- **Pestaña Control:** en ella se encuentran los botones donde se pueden accionar los movimientos de la máquina CNC.

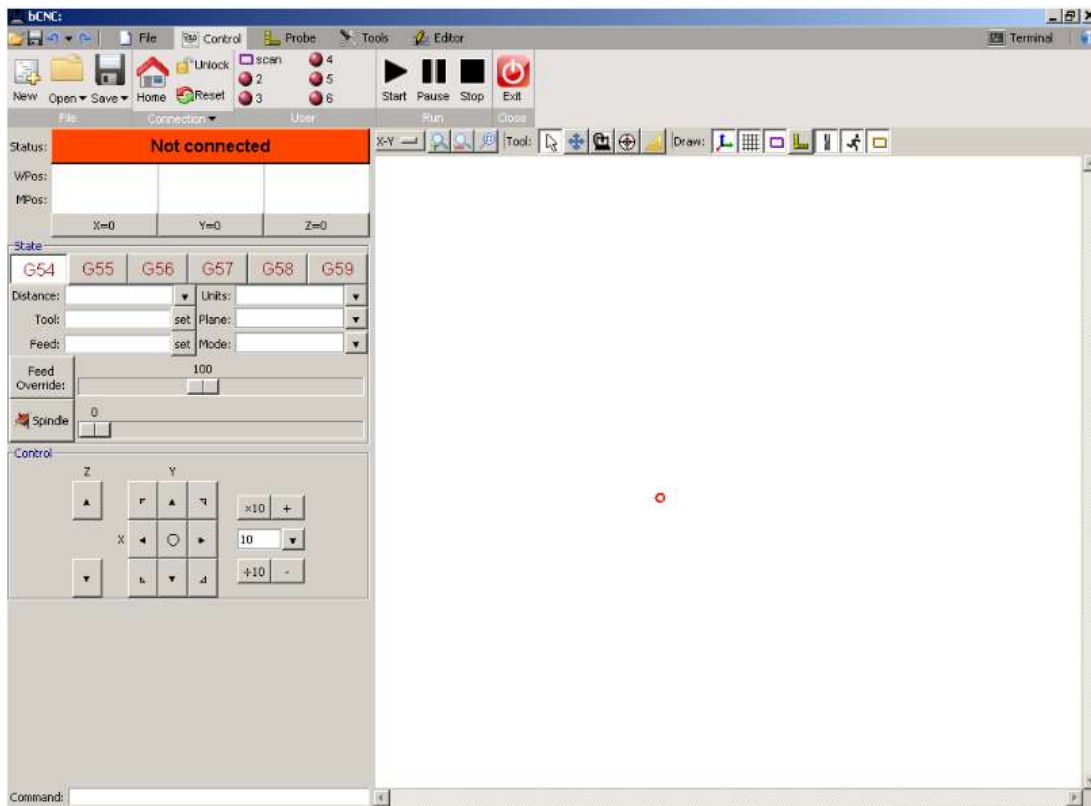


Figura 42 pantalla de control bCNC [54]

En esta pestaña están todas las herramientas de control más comunes del software para CNC.



Figura 43 opciones de control de bCNC [54]

En esta pestaña están las opciones para crear, abrir y guardar código G o cualquier archivo con el que se va a trabajar. Además, tiene la opción de **HOME** (envía el comando G28), y lo que hace es mover los ejes en busca de los finales de carrera interruptores de límite).

Contiene más opciones como:

- ➔ **Unlock:** permite desbloquear la máquina (el firmware GRBL tiene una opción para bloquear los movimientos de los ejes)
- ➔ **Reset:** permite reiniciar el firmware
- ➔ **Scan:** permite hacer un recorrido por los márgenes del vector, código g o diseño. Esta función es muy útil para saber si lo que se va a cortar, entra dentro de la pieza a cortar. Se debe tener la precaución de levantar el eje Z a una posición en la que no tenga riesgos de colisionar con la pieza o algún otro obstáculo.
- ➔ **Start:** inicia el corte o trabajo
- ➔ **Pause:** permite pausar el trabajo
- ➔ **Stop:** permite el paro del proceso que se esté ejecutando.
- ➔ **2, 3, 4, 5 y 6:** son opciones programables o personalizables (aquí se puede escribir comandos).

Además de las opciones mencionadas en esta pantalla de control se encuentra el visualizador del estado de la máquina, donde se puede visualizar estado de la conexión, las posiciones de trabajo y las posiciones de la máquina.

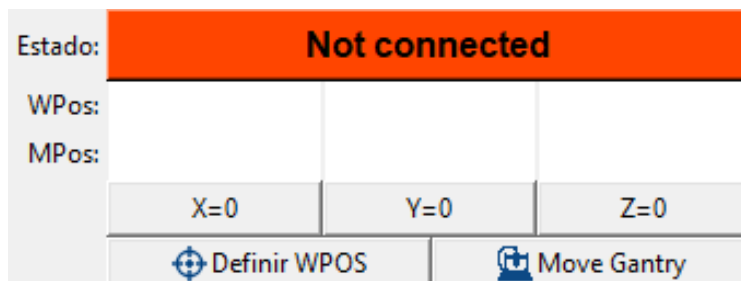


Figura 44 visualizador de estado en bCNC [54]

Debajo de la posición de cada eje se tienen 3 botones con la inscripción **X=0**, **Y=0** y **Z=0**. Estos permiten establecer el cero de cada eje para la posición de trabajo.

El botón **Definir WPOS** (Set Work Position) permite establecer la posición de trabajo de los ejes con solo hacer 2 click, es decir, que con solo 2 click se le puede decir al programa que en la posición donde se da click es donde están posicionados los ejes X e Y en ese momento.

Ejemplo de uso: mover los ejes a una posición determinada donde se quiere que quede el centro del trabajo. Para esto se da click en **Definir WPOS** y se da click en el centro del código g en el visor.

El botón **Move Gantry** permite mover con 2 click el cabezal a la posición del código g que se indique en el visor.

Ejemplo de uso: se hace click en **Move Gantry** y luego se hace click en el centro del código g, como resultado los ejes X e Y se moverán hasta alcanzar la posición señalada con el puntero.

Esto es muy útil por ejemplo para saber dónde estará el centro del código g en el material o pieza a cortar, de modo que con esta herramienta se puede mover con 2 click a cualquier posición del plano de visión. Se debe tomar en cuenta que los ejes se moverán de acuerdo al plano de visión, de modo que si se está en el plano X-Z los ejes que se moverán serán X y Z.

La sección **workspaces**, tiene 6 espacios de trabajo (G54, G55, G56, G57, G58 y G59) donde se puede personalizar distintas configuraciones para aplicarlas al trabajo que este por realizar. Aquí se definen valores como el modo de desplazamiento (absoluto o incremental), las unidades de trabajo (mm o Pulgadas) plano de trabajo (XY, YZ o ZX), herramienta a utilizar, y el feed rate (velocidad de alimentación).



Figura 45 workspaces de trabajo [54]

El control de los ejes tiene acceso a los botones correspondientes al control manual de los ejes de la máquina CNC donde además se puede seleccionar la cantidad de unidades de desplazamiento.

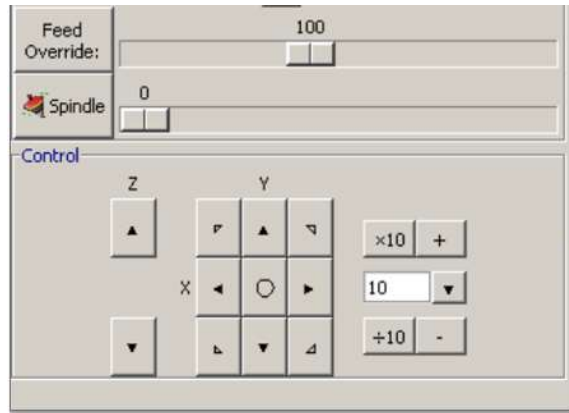


Figura 46 control de ejes en bCNC [54]

- **Pestaña Herramientas** o **tools**: tiene la posibilidad de configurar y guardar los materiales o sustratos que se usan y lo mismo se puede hacer con las herramientas de corte. Esto sirve en caso de que se genere las trayectorias directamente desde bCNC, ya que en bCNC es posible importar directamente vectores con formato:
 - ➔ **DXF** (Drawing Exchange Format): archivos para dibujos de diseño asistido por computadora (CAD)
 - ➔ **SVG** (Scalable Vector Graphics): gráficos vectoriales bidimensionales (estáticos y animados)
 - ➔ **STL** (Standard Triangle Language) archivo informático de CAD que define geometría de objetos 3D, excluyendo información como color, texturas o propiedades físicas que sí incluyen otros formatos CAD.

Dentro de las opciones **CAM**, se tiene herramientas para hacer cortes, perfilados y taladrados. Además de ahuecar una superficie, generar pestañas y aplanar superficies.



Figura 47 herramientas CAM en bCNC [54]

- **Pestaña Editor**: es un editor de código G, que permite hacer modificaciones al código sin regresar al programa encargado del CAM.

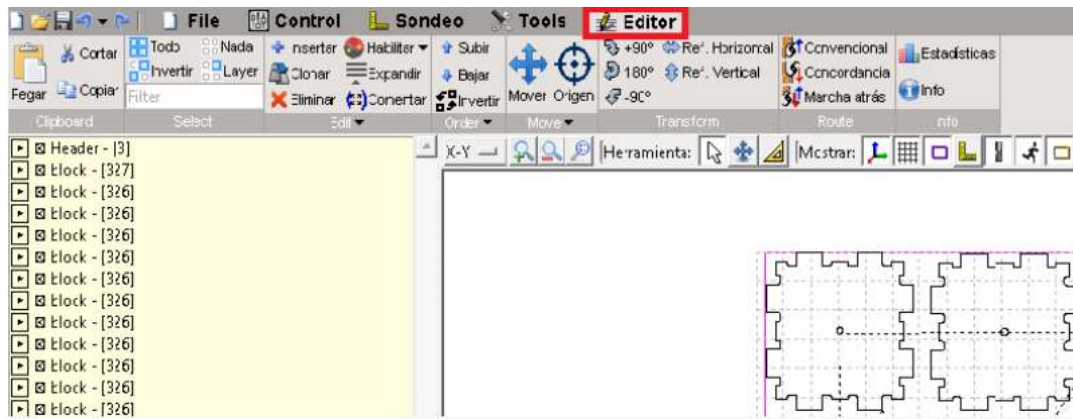


Figura 48 pestaña Editor de código g en bCNC [54]

Entre las opciones del menú de edición se puede encontrar las funciones de copiar y pegar lo que permite duplicar una porción del código, opciones de selección de bloques de código lo que facilita la edición.



Figura 49 menú de editor en bCNC [54]

Las opciones que se pueden encontrar en esta pestaña permiten al usuario realizar diferentes tareas o acciones dependiendo de sus necesidades.

- ➔ *Insertar*: permite agregar líneas de código dentro de un bloque.
- ➔ *Clonar*: permite duplicar bloques
- ➔ *Eliminar*: permite la eliminación de bloques
- ➔ *Habilitar o deshabilitar*: permite que los bloques no se ejecuten, pero sin borrarlos.
- ➔ *Subir y Bajar*: cambian el orden en el que se ejecuta un bloque de código, esto permite ordenar el código g al gusto del usuario
- ➔ *Invertir*: permite invertir el orden de los bloques seleccionados
- ➔ *Mover*: permite cambiar la posición de los bloques simplemente seleccionando un bloque y arrastrarlo a la posición deseada. Es necesaria para mover bloques que fueron clonados o copiados
- ➔ *Origen*: establece el origen lo que permite mover todo el trabajo, a la posición donde se haga clic con el ratón.

- **Visor de trabajo:** permite visualizar los procesos que se están ejecutando en cada opción elegida por el usuario.

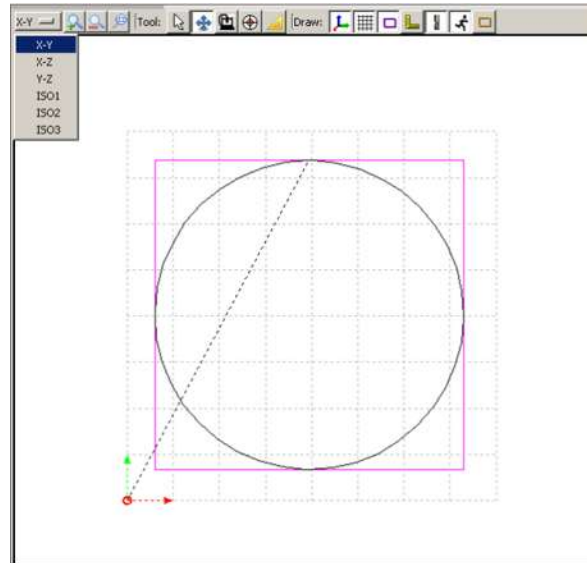


Figura 50 visor de trabajo en bCNC [54]

En este visor de código G o archivo que se esté ejecutando, se puede seleccionar los distintos planos de vista, (XY, XZ, YZ, ISO1, 2, 3). Además, se tiene los controles de “**zoom+**”, “**zoom-**” y “**mostrar todo**”.

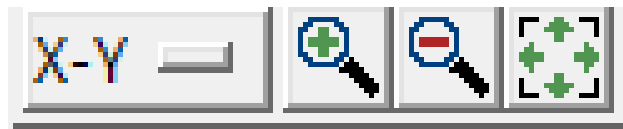


Figura 51 planos y controles de vista del visor de trabajo en bCNC [54]

En la sección herramienta (tool) se tiene 3 opciones:

- ➔ **Selección:** permite seleccionar partes del código g para realizar acciones como eliminar o desactivarlas entre otras.
- ➔ **Mover vista:** permite mover la posición del modelo en el visor.
- ➔ **Regla:** muestra la distancia entre 2 puntos al seleccionarlos y moverlos con el ratón.

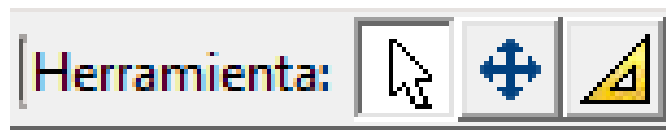


Figura 52 sección herramienta de visor de trabajo en bCNC [54]

En la sección Mostrar (Draw) se tiene opciones para activar o desactivar la visualización de las diferentes partes del trabajo.

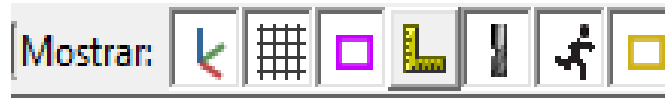


Figura 53 sección mostrar de visor de trabajo en bCNC [54]

Las opciones son las siguientes:

- ➔ *Ejes de referencia (Display Axis)*: permite activar o desactivar la visualización de los ejes del visor.
- ➔ *Rejilla (Grid Lines)*: activa o desactiva la visualización de la cuadrícula.
- ➔ *Límites del gcode cargado (Display Margins)*: permite activar o desactivar la visualización de los márgenes del código g cargado.
- ➔ *Datos de auto-nivelado (Probe)*: permite mostrar los datos del sondeo.

Por último, las demás opciones permiten activar o desactivar la visualización de los movimientos G1, G2 y G3 o los movimientos de corte. Además, se tiene la opción para desactivar los movimientos G0 o los movimientos rápidos y la opción de activar y desactivar los límites del área de trabajo.

- **Terminal:** provee una forma de programar algunas funciones del controlador directamente mediante el uso de su terminal, además de ejecutar comandos a la máquina CNC.

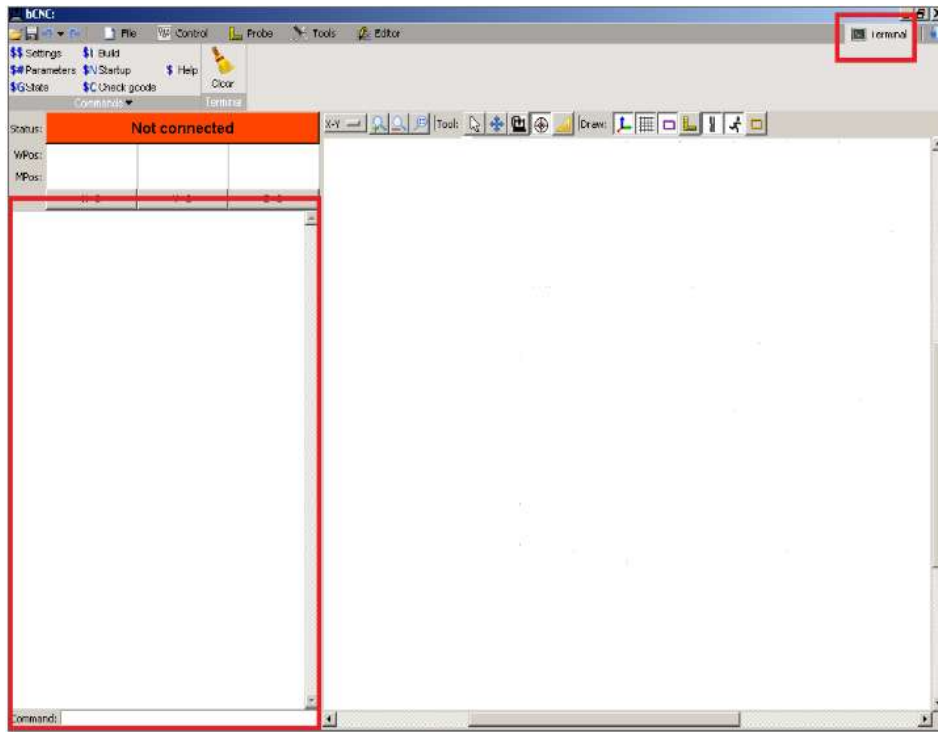


Figura 54 pantalla de terminal en bCNC [54]

4.3 Software para diseño de PCBs

Primeramente, se explica brevemente en que consiste una PCB y sus características.

Una tarjeta de circuito impreso o también llamada PCB (Printed Circuit Board), es una placa o superficie, donde se montan (ensamblan) y conectan eléctricamente los diversos componentes electrónicos por medio de pistas de cobre [58]. Las siguientes imágenes muestran en la parte de arriba, una PCB con sus componentes ensamblados y en la parte de abajo la PCB sin componentes.

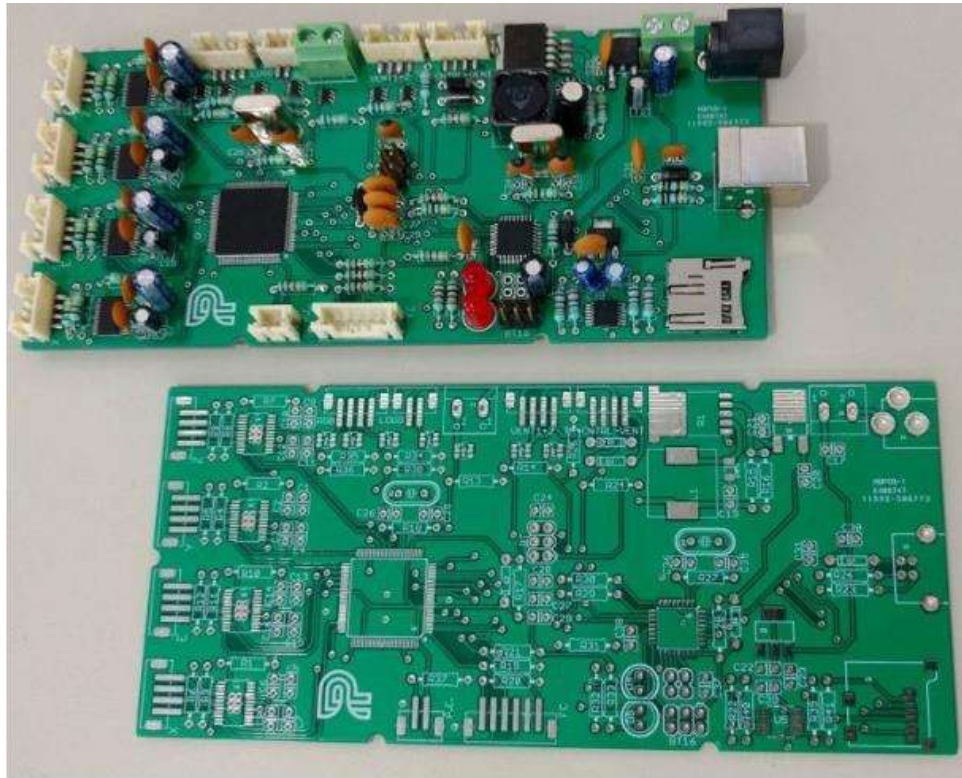


Figura 55 PCB con y sin componentes ensamblados [58]

Las PCBs diseñadas contienen algunos elementos o capas que dependiendo del trabajo que vayan a realizar así será su creación. En la imagen siguiente se muestra algunos de ellos.

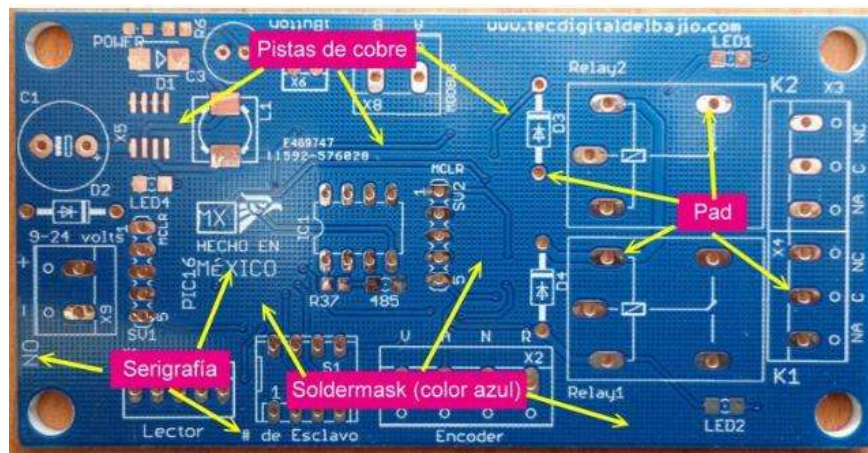


Figura 56 elementos de una PCB [58]

La siguiente imagen muestra una ampliación de un corte transversal de una PCB, donde se observan algunas de estas partes.

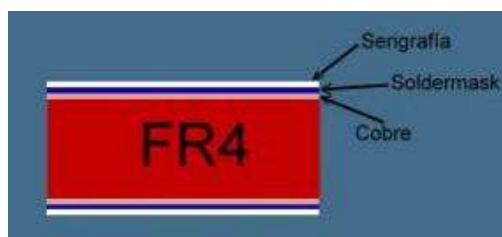


Figura 57 corte transversal de una PCB [58]

El material base donde se depositan todos los componentes de la PCB es comúnmente fibra de vidrio o también llamado FR4, él cuál le da al circuito impreso su rigidez y grosor (aunque también hay PCB flexibles).

Pistas de cobre: la PCB está formada por pistas de cobre que interconectan los componentes electrónicos, y es por estas por donde circula la corriente eléctrica.

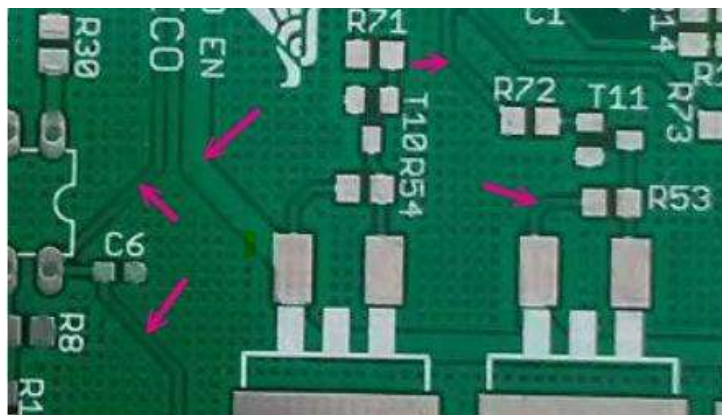


Figura 58 pistas de cobre de PCB [58]

Las pistas de cobre son de diferentes tamaños ya que depende de la cantidad de corriente eléctrica que circula por ahí, entre más corriente, la pista de cobre debe estar más ancha, si son señales de baja corriente, la pista es más delgada.

SolderMask: también conocida como mascara antisoldante, es una capa que cubre casi por completo a la PCB y le da un color característico, la cual impide que la soldadura u otros elementos metálicos hagan cortocircuitos en la baquelita, además de que no se oxide.

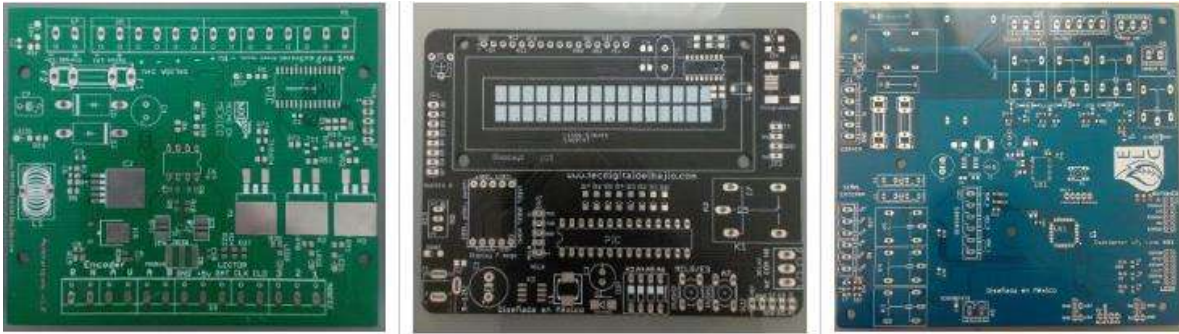


Figura 59 diferentes capas SolderMask de PCB [58]

La máscara antisoldante o soldermask se usa para recubrir todas las pistas de cobre para así evitar su oxidación, se deja sin soldermask, la parte donde se soldán los componentes llamada PAD, todo lo demás se recubre. La soldermask también sirve para aislar las conexiones de cobre y evita cortos circuitos cuando se realiza el ensamble o soldado de los componentes, o cortos circuitos si la PCB toca accidentalmente otros metales.

PAD: son las porciones de la pista de cobre donde se soldán los componentes, los hay de dos tipos los llamados PAD para componentes "trough hole" y los PAD para componentes SMD (Dispositivo de Montaje Superficial). En la siguiente imagen muestra ambos PADs.



Figura 60 PADs de una PCB [58]

Los componentes que son trough hole atraviesan la PCB (son componentes con "patitas") y casi siempre se ensamblan por abajo y los componentes SMD generalmente se soldán en la parte de arriba, eso implica pues que haya dos capas de cobre, una en la parte de abajo y otra en la parte de arriba.

Serigrafía: también llamada Silkscreen en inglés, es una capa que se coloca encima de la SolderMask, y sirve para agregar nombres, símbolos o letreros a la PCB, algunos de estos símbolos, sirven para identificar los componentes y sea más fácil el ensamble.

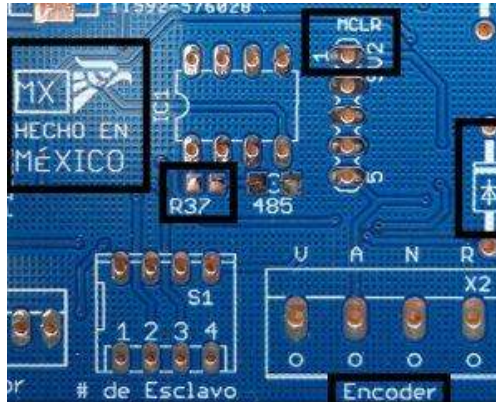


Figura 61 serigrafía de una PCB [58]

En la imagen, se observa el logo de “Hecho en México”, la “R37” denota que ahí se va a soldar una resistencia, a la derecha se nota dibujado el diodo, así se sabe fácilmente cuál es su ánodo y cátodo. El diseñador puede colocar lo que se requiera en esta capa.

Capas en una PCB

Las tarjetas de circuitos impresos se pueden diseñar con una o varias capas de cobre, estas capas o en ingles layers, pueden ser de 1 capa de cobre, donde los componentes están por la parte superior (capa llamada TOP) y se soldan por la parte inferior (BOTTOM).

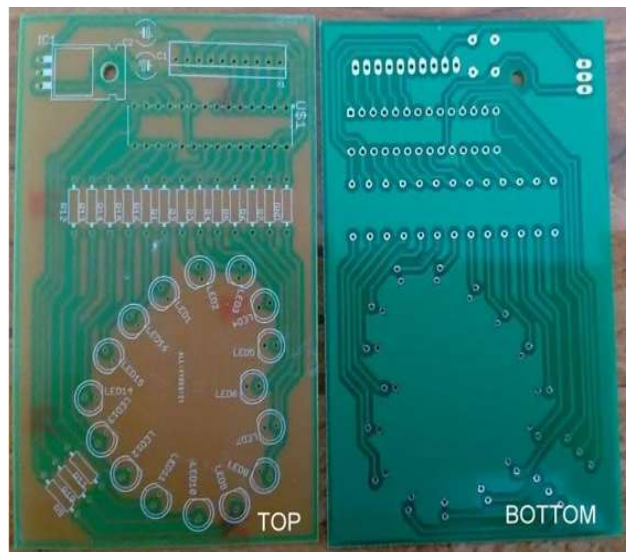


Figura 62 capas TOP y BOTTOM de una PCB de 1 capa de cobre [58]

También, existen PCBs de 2 capas, como en la siguiente imagen, donde hay pistas de cobre en la parte superior y en la parte inferior.

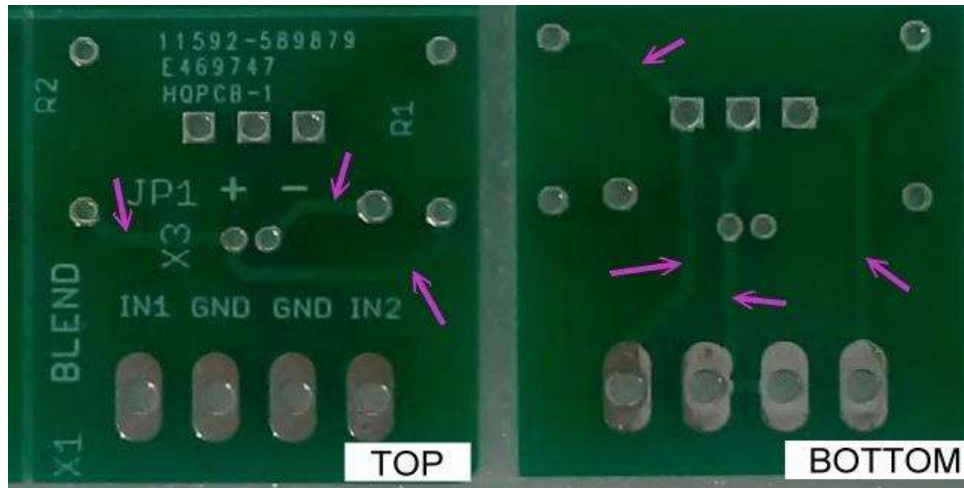


Figura 63 capas TOP y BOTTOM en una PCB de 2 capas de cobre [58]

Vías: son el medio de comunicación entre la capa superior con la inferior de una PCB, es una perforación metalizada que sirve para interconectar las pistas de la parte superior con las pistas de la parte inferior, y así tener circulación de corriente eléctrica, en ambas capas. En la imagen siguiente se remarcan con flechas, las vías.

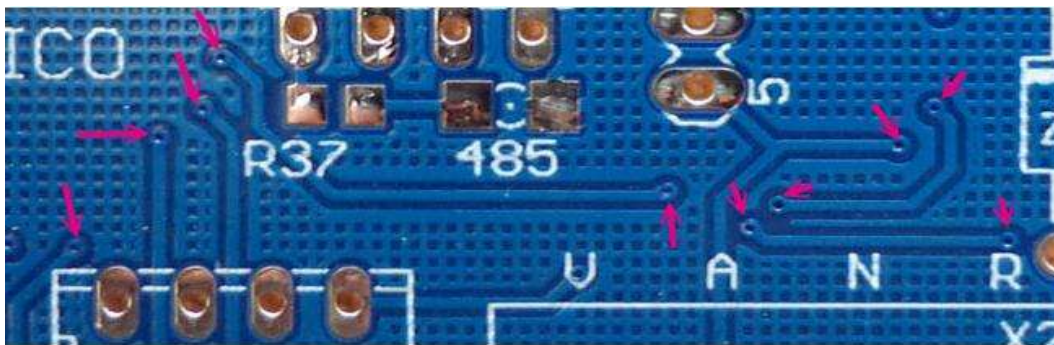


Figura 64 vías de una PCB [58]

Una vez visto en que consiste las PCBs se explica el software que se utiliza en este trabajo para el diseño de estas.

Software Eagle

Existen varios software para el diseño de PCBs pero uno de los más utilizados es el que se menciona a continuación.

El software utilizado se denomina Eagle y está desarrollado por la compañía Autodesk®.



Figura 65 logo del software Eagle [58]

Eagle es un software destinado al diseño de placas de circuito impreso (PCBs), es un software para automatización del diseño electrónico (EDA). Permite a los diseñadores de circuitos impresos conectar sin problemas diagramas esquemáticos, ubicación de componentes, enrutamiento de circuitos impresos y contenido completo de bibliotecas [58].

El software Eagle ocupa algunos requisitos para su instalación y dependiendo el sistema operativo en el que se va instalar deben cubrirse estos. En la siguiente tabla se muestra los requisitos a cumplir dependiendo el sistema operativo.

Sistema operativo	Requisitos
Windows	Se requiere Microsoft® Windows® 7 o posterior. Requiere un sistema operativo de 64 bits.
Linux	Linux® basado en el kernel 2.6 para equipos Intel, X11 con una profundidad de color mínima de 8 bpp y las bibliotecas en tiempo de ejecución libssl.so.1.0.0, libcrypto.so.1.0.0 y CUPS para la impresión. Requiere un sistema operativo de 64 bits y libc.so.6 con la versión secundaria GLIBC_2.14 o posterior.
Mac	Apple® Mac OS® X 10.10 o posterior para equipos Intel.
Todos los sistemas operativos	Una resolución gráfica mínima de 1024 x 768 píxeles y, preferiblemente, un ratón con rueda de 3 botones.

Tabla 6 requisitos de sistema operativo para Eagle [5]

Eagle es famoso alrededor del mundo de los proyectos electrónicos, debido a que muchas versiones de este programa tienen una licencia Freeware, es decir, una licencia de uso, que permite su redistribución, pero con algunas restricciones, como la no modificación del software o la venta de la misma. Además de una gran cantidad de bibliotecas de componentes alrededor de la red.

Básicamente el software Eagle se utiliza haciendo un esquemático del circuito y posteriormente pasarlo a un diseño en PCB para observar las trayectorias y demás características de la PCB.

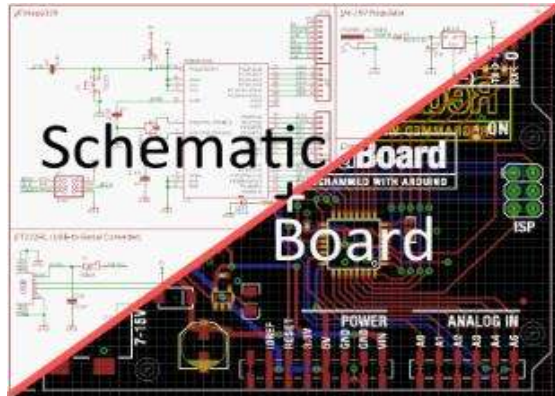


Figura 66 conversión de esquemático a PCB en Eagle [61]

Teniendo el diseño en PCB, Eagle contiene una herramienta que permite generar código G para usar con fresadoras CNC o enrutadores, permitiendo grabar mecánicamente placas de PCB, perforarlas y fresarlas, evitando la fabricación de los mismos diseños realizados con productos químicos.

Esta herramienta se llama 'pcb-gcode' el cual es un programa de lenguaje de usuario o "ULP" (User Language Programs) que es una de varias herramientas que contiene el software Eagle.

El lenguaje ULP permite a un usuario generar acciones, subprocesos, o cualquier otra cosa que necesite el usuario, y que EAGLE no posea como función básica.

En el ULP 'pcb-gcode' permite configurar los parámetros de la máquina como la profundidad de desbaste, velocidades de los ejes de movimiento, ancho de la broca, etc. Así como la elección de generar las capas de la PCB.

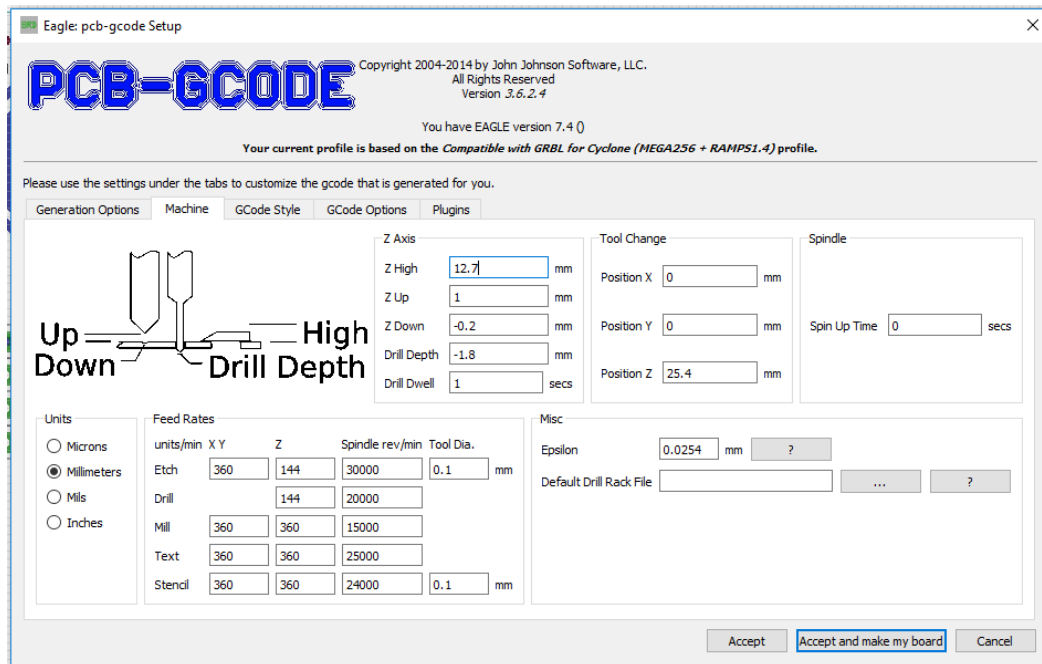


Figura 67 ULP 'pcb-gcode' de Eagle [6]

Capítulo 5 Pruebas y resultados

A continuación, se expone el trabajo realizado por la maquina CNC para observar el funcionamiento correcto de esta, explicando todo el procedimiento que se realizó desde el diseño hasta la fabricación y conexión.

5.1 Esquemático de la PCB

Como prueba del funcionamiento de la máquina se realiza una PCB la cual contiene los componentes del filtro pasa bajas que se adicionó para las señales leídas del controlador para la eliminación del ruido electromagnético y las conexiones entre el controlador y el puerto paralelo.

La prueba se basa desde el diseño hasta las características que se requiere para la fabricación de la PCB.

Para el diseño de la PCB se usa el software Eagle en el cual se realiza primeramente el esquemático de la PCB donde se incluyen los componentes y las conexiones a realizar.

Esquemático de la PCB

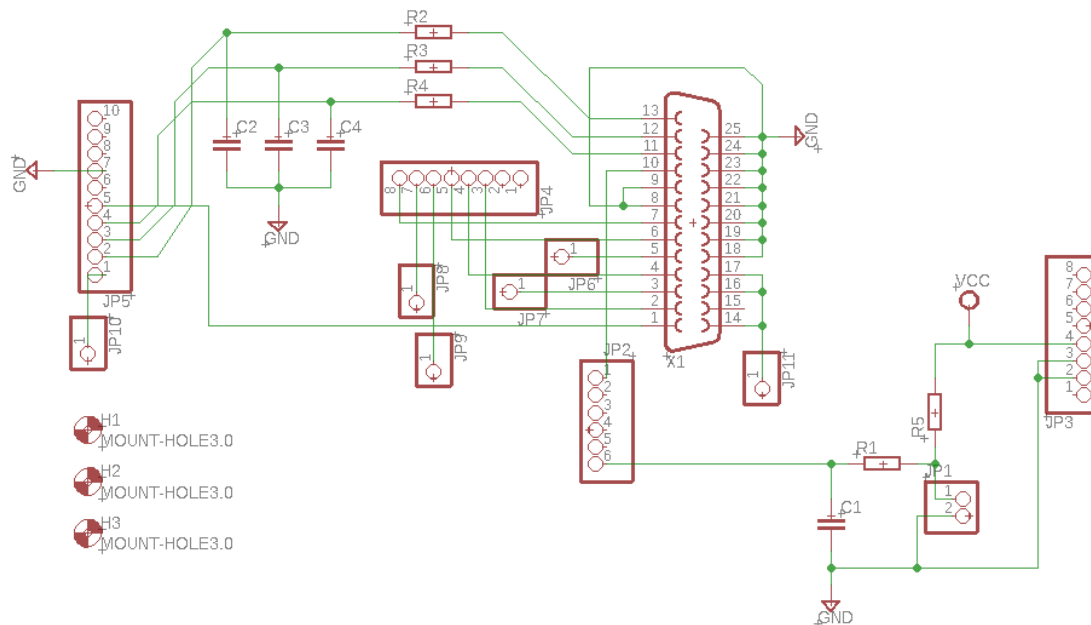


Figura 68 esquemático de la PCB

5.2 Board de la PCB

Una vez realizado el esquemático se pasa a realizar la Board de la PCB donde se indican todas las características que tendrá la PCB como el ancho de las pistas, el diámetro de los orificios, etc.

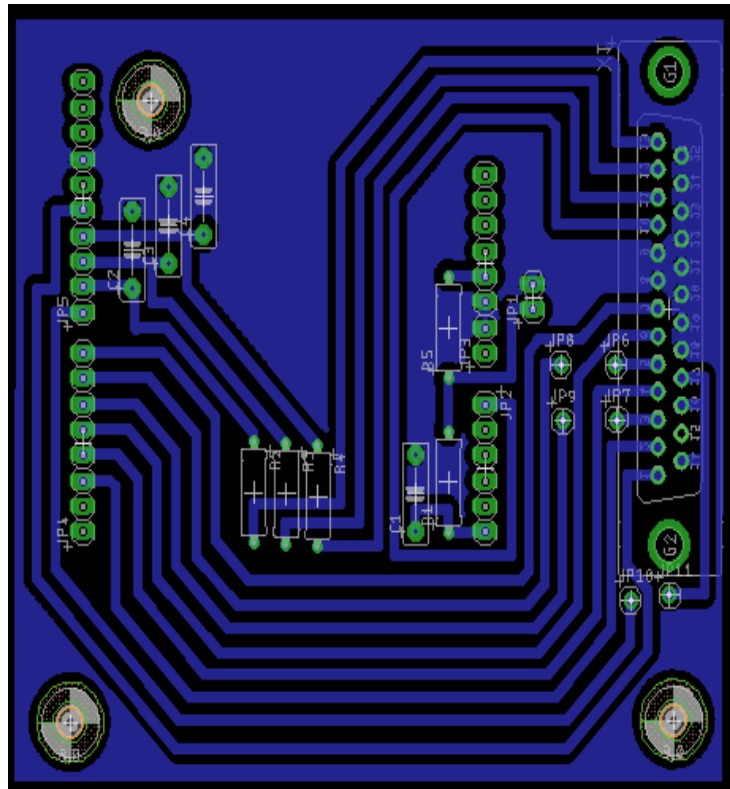


Figura 69 Board de la PCB

5.3 Programa pcb-gcode

Una vez terminada la Board de la PCB se elige el programa de lenguaje de usuario (ULP) llamado “pcb-gcode” el cual genera los archivos que contienen código G que especifica las características de fabricación que debe llevar la PCB como las pistas, serigrafiado, orificios, velocidades de los ejes, diámetro de la fresa, etc., según sea la configuración del usuario y que realizará la máquina CNC.

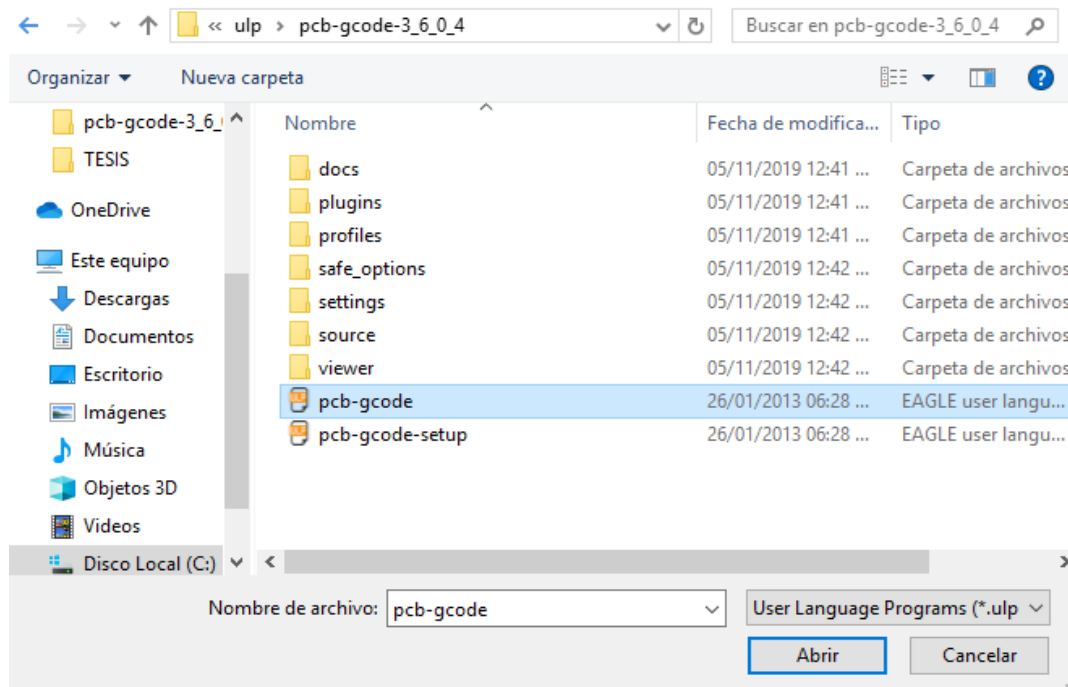


Figura 70 selección de ULP "pcb-gcode"

Seleccionado el ULP “pcb-gcode”, en la carpeta donde se encuentra el proyecto realizado, se encontrarán los archivos generados por este ULP, los cuales como se dijo contendrán el código G de las características de la PCB para que la máquina CNC pueda fabricarla.

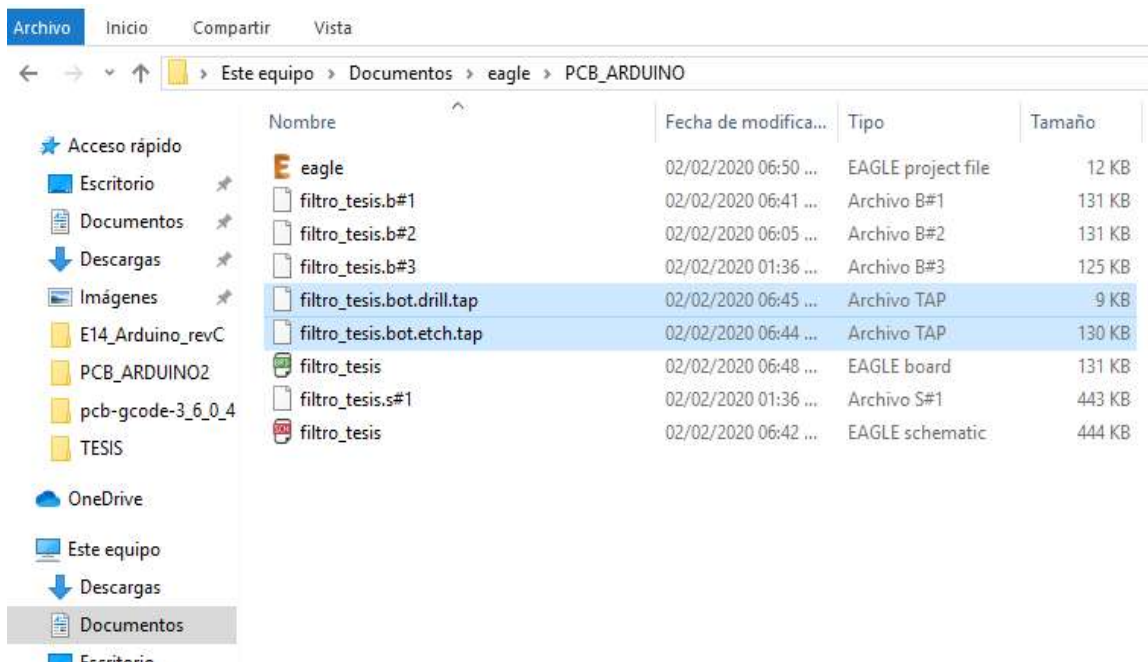


Figura 71 archivos generados por el ULP "pcb-gcode"

5.4 Ejecución del programa bCNC

Al iniciar el software bCNC primeramente se pasa a configurar manualmente el “cero” de la máquina CNC que servirá como referencia para las longitudes a trazar contenidas en los archivos con código G del diseño (para esto es también necesario utilizar el sistema de sondeo para obtener el “cero” en la posición del eje Z).

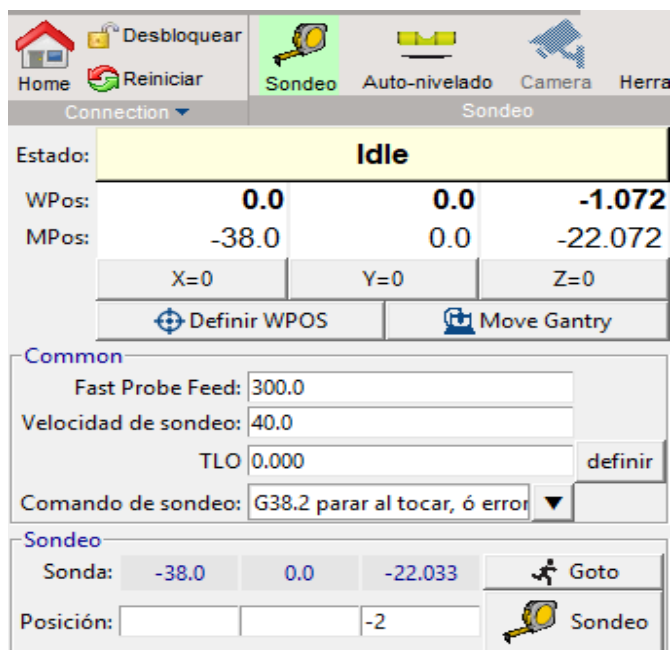


Figura 72 sistema de sondeo del software bCNC

Una vez fijado el “cero” de la máquina que tendrá como referencia, se busca el nombre del archivo que se va ejecutar en la máquina CNC (en este caso la capa Bottom de la PCB).

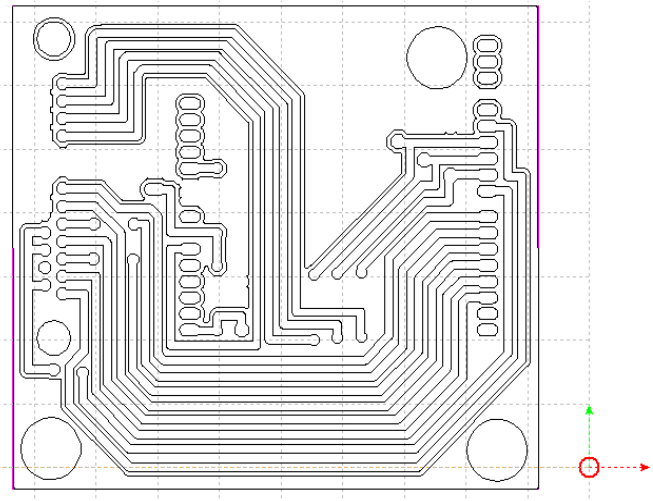
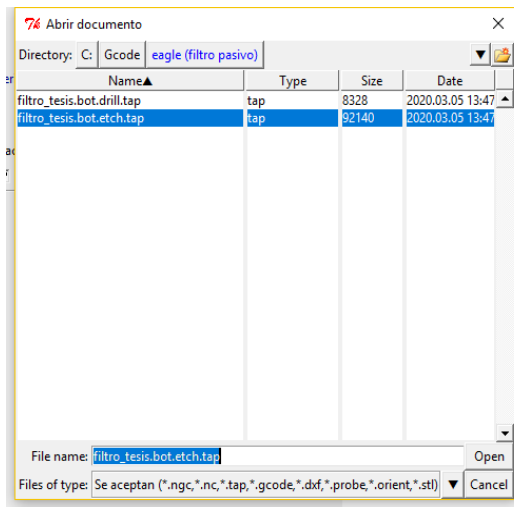


Figura 73 selección del archivo de la capa Bottom de la PCB

Después de abrir el archivo seleccionado se puede visualizar el trabajo que realizará la máquina CNC para el proceso de fresado de la PCB

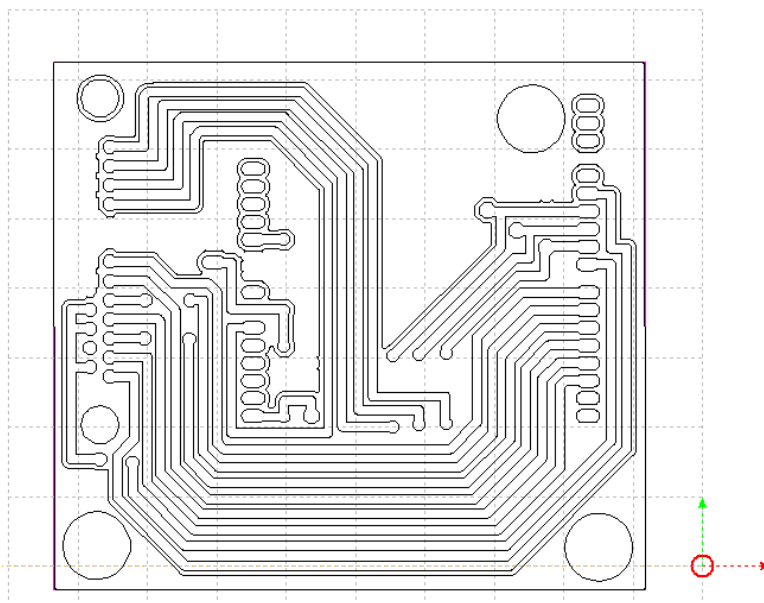


Figura 74 visualización de la capa Bottom de la PCB en el software bCNC

Al observar la figura anterior puede notarse que la capa Bottom se encuentra un poco desplazada con respecto a la referencia, es decir, al “cero” de la máquina.

Gracias a sus herramientas de edición del software bCNC es posible mover la capa de tal manera que quede bien ubicada con respecto al “cero” de la máquina para una mejor comodidad del usuario.

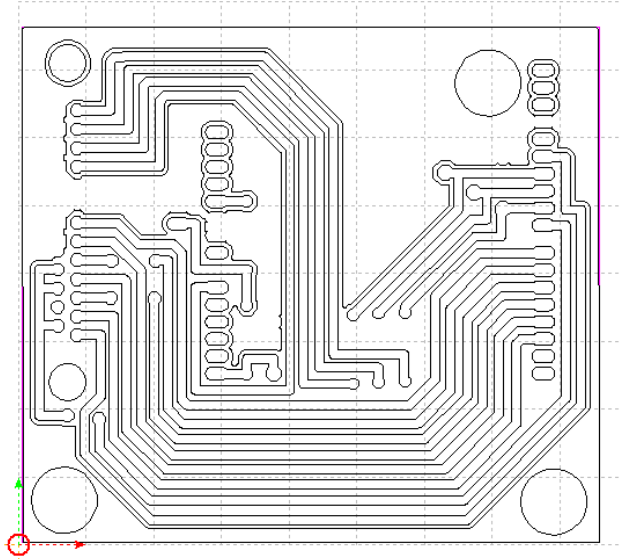


Figura 75 capa Bottom en los ejes X e Y y cerca de la referencia

El siguiente paso es el utilizar el sistema de autonivelamiento de la máquina CNC (sonda) para obtener los datos de la deformación física de la placa de cobre donde se realizará la PCB diseñada.

Se anotan algunos parámetros como las dimensiones de tamaño de la placa de cobre (largo y ancho), el número de muestras que se requieren escanear en el eje X y eje Y, así como la mínima y máxima longitud de movimiento para el eje Z.

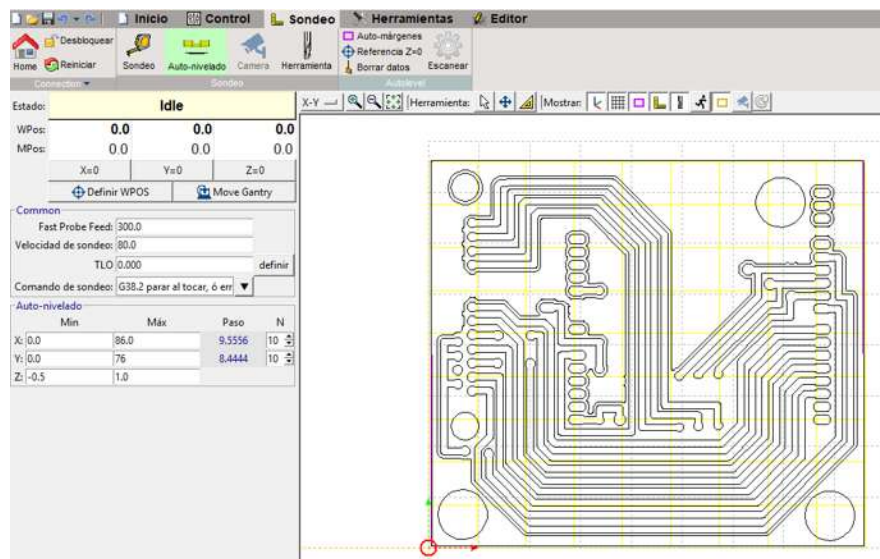


Figura 76 parámetros de autonivelamiento de la superficie de la PCB

Anotados dichos parámetros el siguiente paso es escanear el área de la placa de cobre para generar datos que muestran las deformaciones de esta, y cuyos datos son guardados para

nido los datos de nivelación de la superficie de la placa de cobre
archivo que actualmente está cargado, en este caso la capa Bottom.

so de fabricación de la PCB la visualización de la placa
o que significa que el proceso se ha terminado.

81

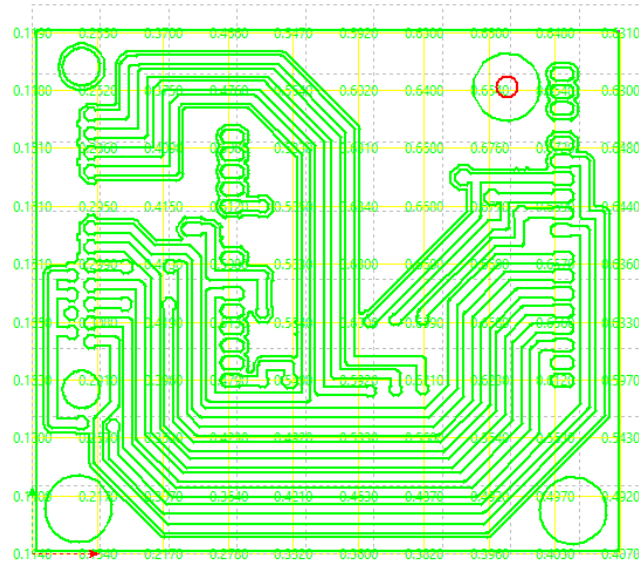


Figura 79 PCB terminada en el software bCNC

En la siguiente figura se muestra el PCB creado en la placa de cobre la cual muestra la capa de las pistas (Bottom) y la cara en la cual se montaron los componentes (Top).

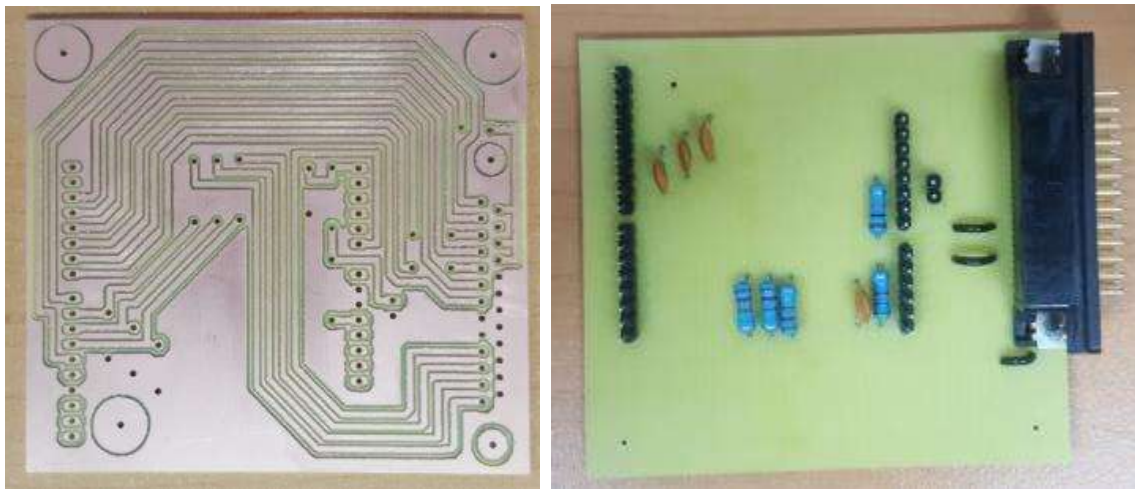


Figura 80 PCB fabricada en la placa de cobre

Finalmente, después de haber fabricado la PCB se pasa a conectarla a la placa que controla los drivers de los motores y los accesorios de la máquina CNC para el uso de la misma.



Figura 81 PCB conectada al driver de la maquina CNC

Capítulo 6 Conclusiones

En este capítulo se exponen algunas conclusiones a las que se llegaron tras el desarrollo y resultados del trabajo, expuesto anteriormente.

El objetivo fundamental de esta tesis es dar a conocer el reacondicionamiento de la máquina CNC, fundamental para su correcto funcionamiento. Explicando los diferentes conceptos necesarios para comprender el manejo de las máquinas CNC.

La aportación principal consiste en el rediseño que se realizó en la máquina CNC utilizando hardware en buenas condiciones como los drivers de movimiento, interruptores de límite de paro, botón de paro emergente y los motores paso a paso que contenía. Además, se fue adaptando hardware nuevo como interruptores de límites de paro extras herramienta de trabajo (husillo), diseño y elaboración de filtro pasa bajas para la eliminación de ruido electromagnético generado por los motores paso a paso de la máquina.

El reacondicionamiento de la máquina CNC contempla el cambio de protocolo de comunicación que fue de un protocolo de puerto paralelo a uno de puerto serial lo que llevó al uso del microcontrolador Arduino como controlador de la máquina ya que cumplía con los requerimientos que se necesitaban.

Para trabajos fabricados por la máquina CNC en placas conductoras se realizó un sistema de autonivelación para medir las deformaciones que lleguen a tener, esto como medida de exactitud para los diseños elaborados por el usuario.

También fue necesario el uso de varios software como Fusion 360 y Cura para diseño y elaboración de la base de la herramienta de trabajo. Así como el software bCNC para poder controlar, visualizar y operar la máquina CNC en los trabajos que realizados. Además, de el software Eagle para la elaboración del diseño de la PCB donde se ensamblaron los componentes que se adaptaron y crearon.

El reacondicionamiento de la máquina CNC implica tener conocimientos sólidos sobre código G para entender los distintos movimientos y trayectorias realizados de la máquina.

bCNC da acceso a su ejecución tomando por hecho que el usuario que lo utilizara tiene los conocimientos necesarios para fabricar diseños en la máquina.

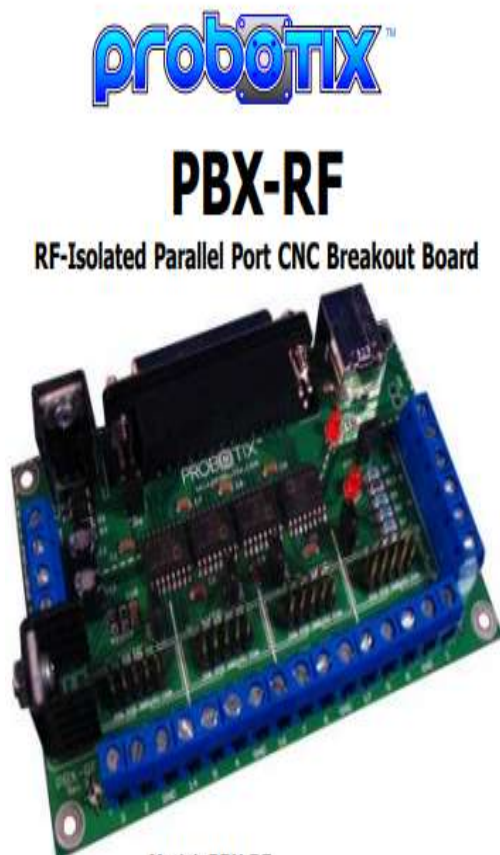
Para observar la funcionalidad de la máquina CNC se hicieron pruebas en distintos materiales como papel, mdf y placas de cobre, para hacer conclusiones sobre la fiabilidad del sistema.

Se hizo la conexión de la computadora con la máquina a través del controlador y drivers que contenía, conectados simultáneamente generando el movimiento de los motores paso a paso y a su vez los ejes de la máquina.

Se utilizó una PC portátil de gama media lo que permitió un buen control y correcta visualización del diseño fabricado por la máquina.

Apéndice

Apéndice 1 hoja de datos de la placa PBX-RF RF Isolated CNC Breakout Board



Model: PBX-RF
Breakout Board Specs:

- DB25 Female
- All Pins Brought Out
- Jumper Enabled Input Pull-up Resistors
- Integrated 5V Logic Supply Regulator
- PBX Pinheader & Screw Clamp Terminals
- USB Powered Logic Supply for PC Side

Description

The PBX-RF is an Isolated Parallel Port Breakout Board designed specifically for Hobby CNC machines. It is compatible with a variety of Parallel Port CNC Control Software. The isolation layer protects the PC from potential damage from spikes or short circuits on the high voltage motor drivers used in CNC.

The RF isolation chips used in the PBX-RF work much like opto-isolators, except that they use radio waves to send signals across the isolation plane rather than light.

The PBX-RF breakout board splits the 17 available signals from the parallel port so that they can be accessed. It is functionally equivalent to the non-isolated version - the PBX-2.

Twelve of the signals are available as outputs to control motors, relays, or other devices. The other 5 signals are configured as inputs. These inputs are typically used for limit and home switches, touch probes, and emergency stop interrupters.

The isolation chips require power supply on both sides of the isolation circuitry. The PC side can be supplied with any DC power supply from 12 to 40 volts capable of at least 100mA. The easiest way to drive this side of the board, however, is by connecting it to a USB connector of the host computer. The PCs USB ports can supply 5VDC at 100mA without needing to enumerate. Be sure to disconnect JP6 when using the USB supply.

The PBX-2 utilizes our standard PBX-Header IDC connectors for easily connecting to our drivers and other peripherals. See Figure 1 for the pinouts of the PBX-Header. The PBX-Header can supply logic side power to your driver boards. Some of our drivers also have on-board logic supply regulators. Use the jumpers JP1-4 to ensure that both regulator sections are not connected at the same time.

The driver side of the PBX-RF has a built in LM317 based voltage regulator section that will supply 1.5AMPS @ +5V to the driver outputs of this interface. The jumpers JP1-4 connect the 5V supply to pin 7 of the PBX-Header.

The LM317 is rated for 40VDC, so you can connect it up to the same power supply as the motors in most cases. You may want to run it off of a WalWart to provide an additional layer of protection and to limit noise. Make sure to test the polarity of the wires from the WalWart, and make sure it is not an AC output device. Any voltage between 6 and 40 volts should work.

The +5VDC logic supply rail connects to the limit switch and e-stop inputs through a jumper connected 1K pull-up resistor network. The pullup resistors are needed in most cases when switching the logic inputs through physical switches. Disconnect JP5 if you do not need the pullups.

Although the PBX-RF is an isolated breakout board, we strongly recommend that you use an add-on parallel port card. Be aware that those \$10 MOSCHIP NM9805 Chipset driven boards will initialize at non-standard addresses. The Windows XP drivers will not let you change the address. This is not a problem for EMC or Mach3, but some CNC control software will not allow you to use a non-standard parallel port address

Figure 1: PBX Header Pin Diagram

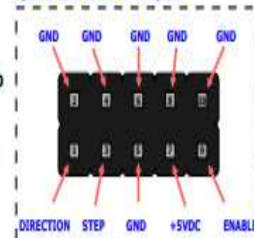


Figure 2: Board Diagram

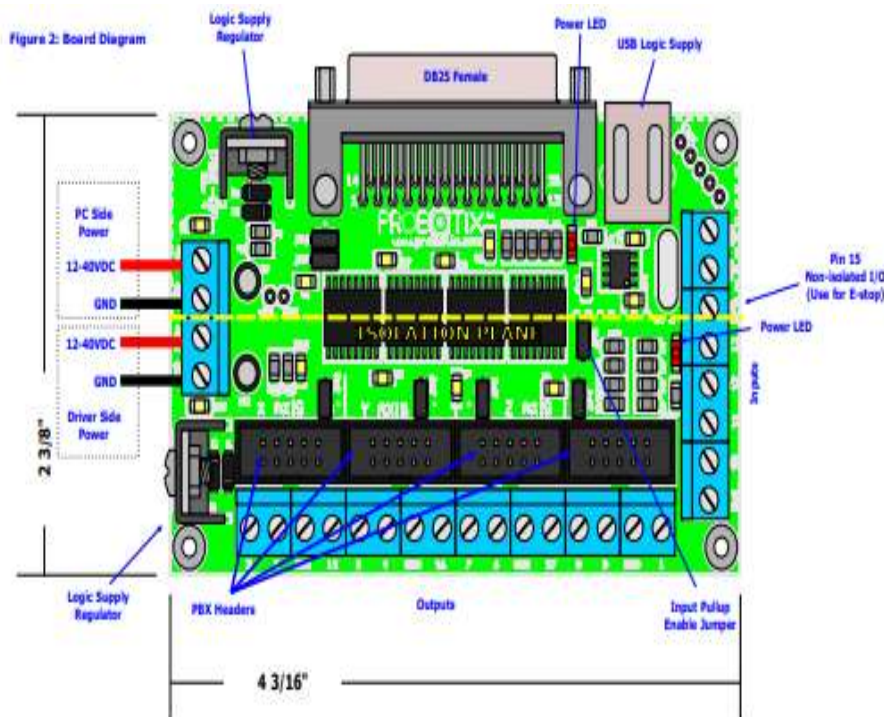


Figure 3: Jumper Functions

JP1	X Axis Power
JP2	Y Axis Power
JP3	Z Axis Power
JP4	A Axis Power
JP5	Input Pull-ups Enable
JP6	Voltage Regulator Isolation
JP7	Input Enable

Figure 6: Parallel Port Signals



Software Setup

Most stepper motor drivers require a step signal and a direction signal. Some drivers also require an enable signal. When using the PBX-Headers, the pinouts for most setups will be configured as in Figure 5.

When wiring your motors, you need not worry about the direction the motors will spin, because this can be reversed in the software configuration. Also, some drivers will step on a transition from low to high, other from high to low, but again, this can be configured in the software.

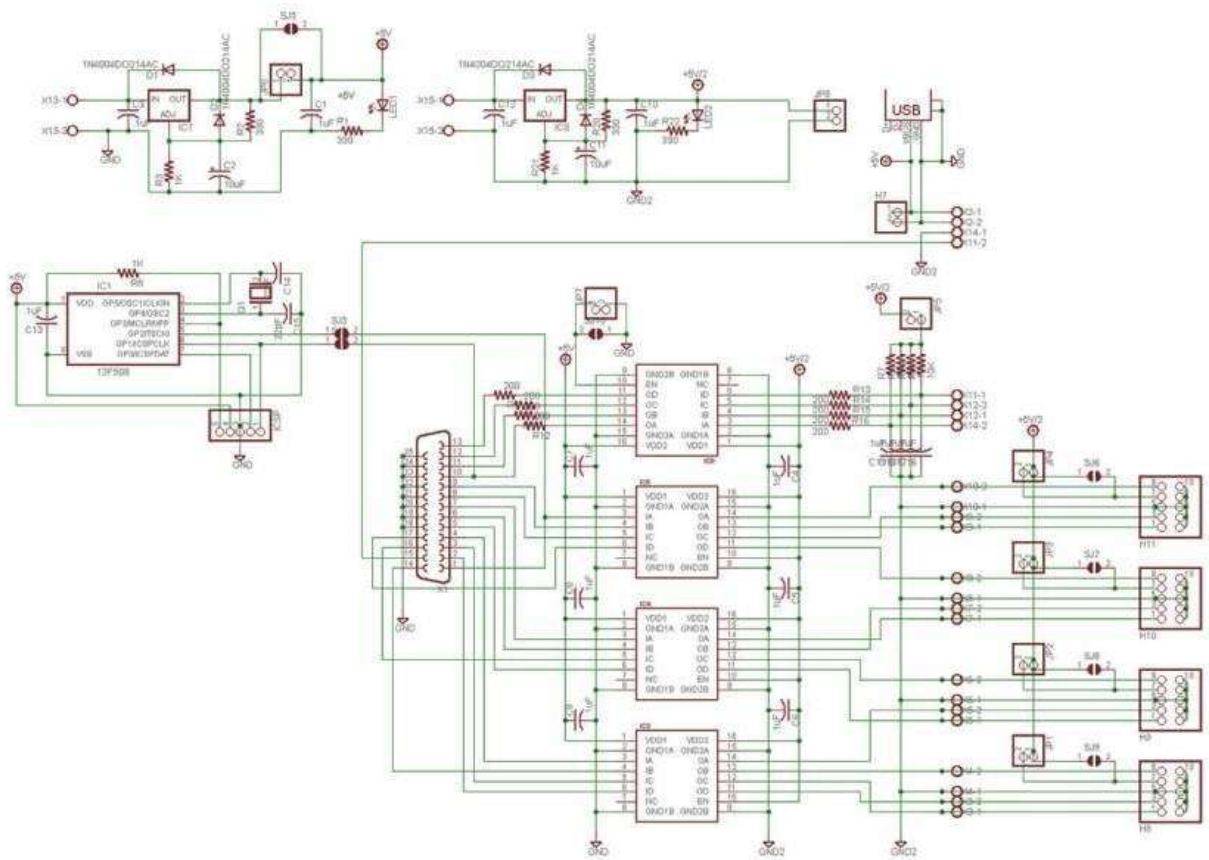
The Parallel Port was primarily designed for controlling printer devices, so on some pins the logic inside of the PC is inverted for different reasons. The best method to determine your exact settings is often trial and error.

The built in parallel port on your PC generally shows up at address 0x378, but that is determined by your BIOS settings, and can be changed in most cases. Add-on parallel port cards are generally the same, but you may or may not be able to change the base address.

Figure 5: Pin Signals

PIN	Signal
1	A Enable
2	X Stop
3	X Direction
4	Y Stop
5	Y Direction
6	Z Stop
7	Z Direction
8	A Stop
9	A Direction
10	E-stop
11	Z Limit
12	Y Limit
13	X Limit
14	X Enable
15	Aux Input
16	Y Enable
17	Z Enable
18 - 25	GND

PROBITIX





RBX-1

3-Channel Opto-isolated Relay Board



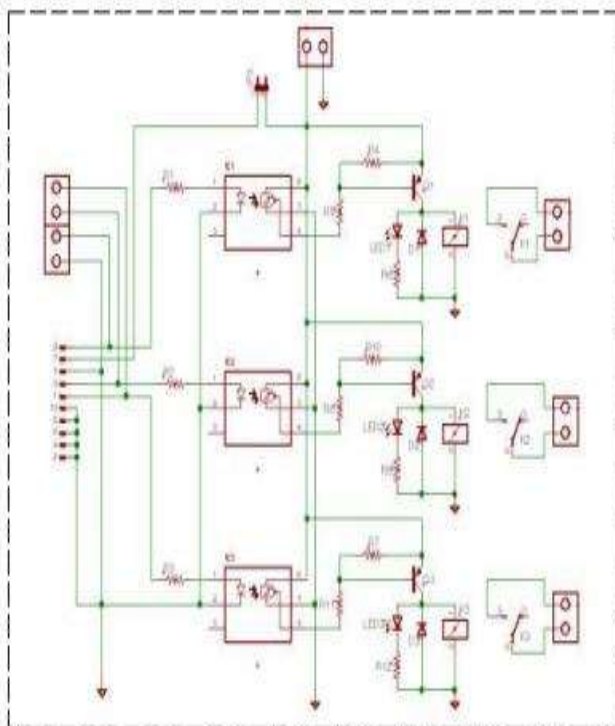
The RBX-1 is a three-channel opto-isolated relay board which can be used to switch high voltage devices such as spindle, coolant pumps, and vacuums, from your CNC control software and in your g-code files. Each relay is rated for 12 amps at 120VAC (or 6 amps at 240VAC). There is an LED for each relay to indicate when they are on.

The opto-isolators which drive the relays are common ground and fed with a +5VDC signal from any un-used output pins from the breakout board. If your parallel port does not output 5 volts or enough current to drive the LEDs inside of the opto-couplers, a buffer chip needs to be used between the parallel port and the opto-coupler. The best solution for this is the PBX-RF isolated breakout board, which has the power to drive the opto-couplers.

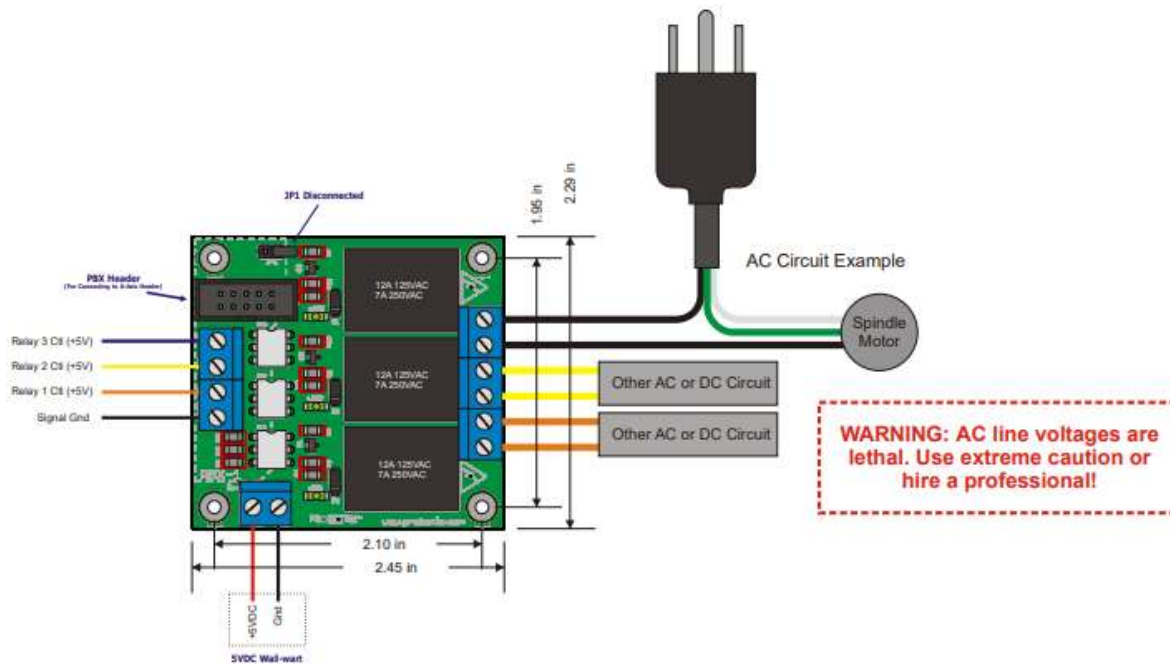
The signals for the RBX-1 can be supplied through screw clamps on the RBX-1. Also, there is an included PBX-header which makes connection to an empty drive header on one of our breakout boards a snap.

The relay side of the opto-couplers require a 5VDC power supply. A 1 amp or greater 5VDC wall-wart type power supply works well for this. When driven from the PBX-RF isolated breakout board and using the PBX-header, JP1 can be installed along with a ground jumper wire eliminating the need for the 5V power supply.

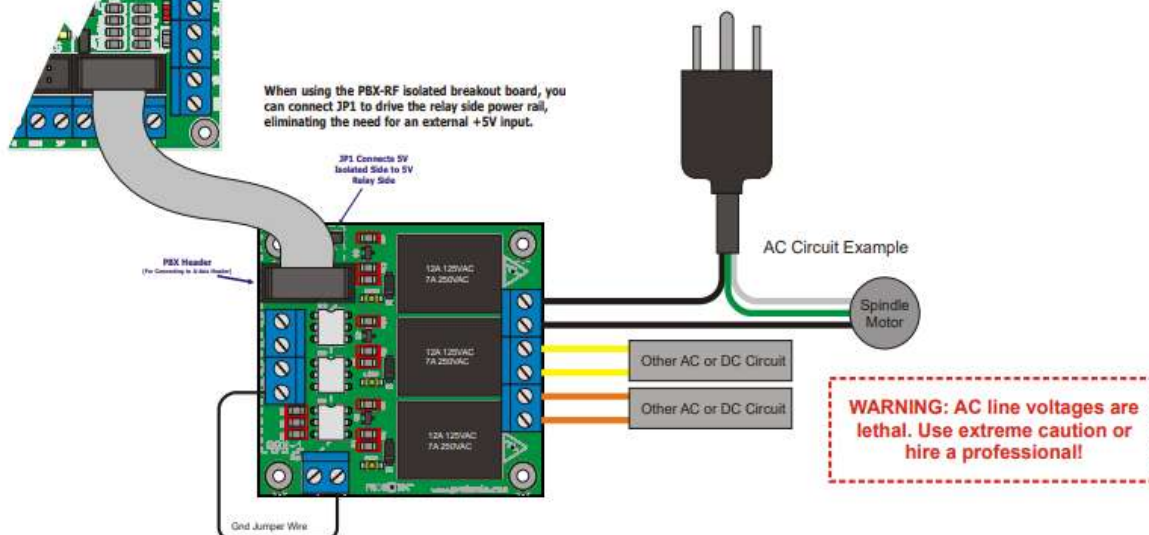
Schematic Diagram



RBX-1 Opto-isolated Relay Board



When using PBX Header w/ PBX-RF Isolated Breakout Board



Disclaimer of Liability and Accuracy: Information provided by PROBOTIX™ is believed to be accurate and reliable. However, PROBOTIX™ assumes no responsibility for inaccuracies or omissions. PROBOTIX™ assumes no responsibility for the use of this information and all use of such information shall be entirely at the user's own risk.

Life Support Policy: PROBOTIX™ does not authorize any PROBOTIX™ product for use in life support devices and/or systems without express written approval from PROBOTIX™.

Warranty: PROBOTIX™ warrants our products against defects in materials and workmanship for a period of 90 days. If you discover a defect, we will, at our option, repair or replace your product or refund your purchase price. This warranty does not cover products that have been physically abused or misused in any way.

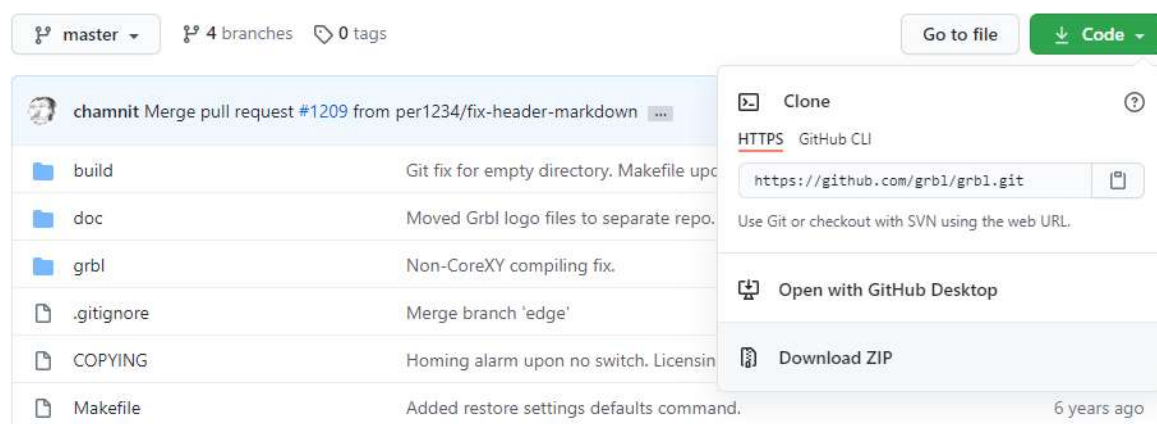
Copyright © 2007-2009 PROBOTIX™

Apéndice 3 cargar el firmware grbl en arduino

Para poder utilizar el arduino como controlador de la máquina CNC es necesario cargar el firmware grbl. A continuación, se enumeran los pasos necesarios para realizar este procedimiento exitosamente.

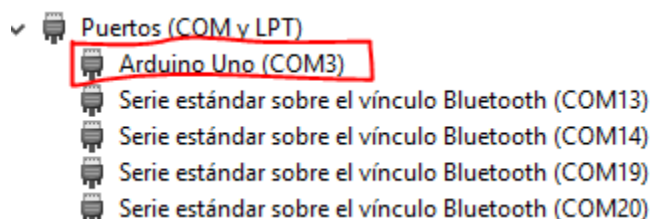
1. Descargar el firmware grbl

Ir a la página oficial de grbl (<https://github.com/grbl/grbl>), seleccionar la parte llamada “código” y descargar el ZIP.



2. Conectar el arduino

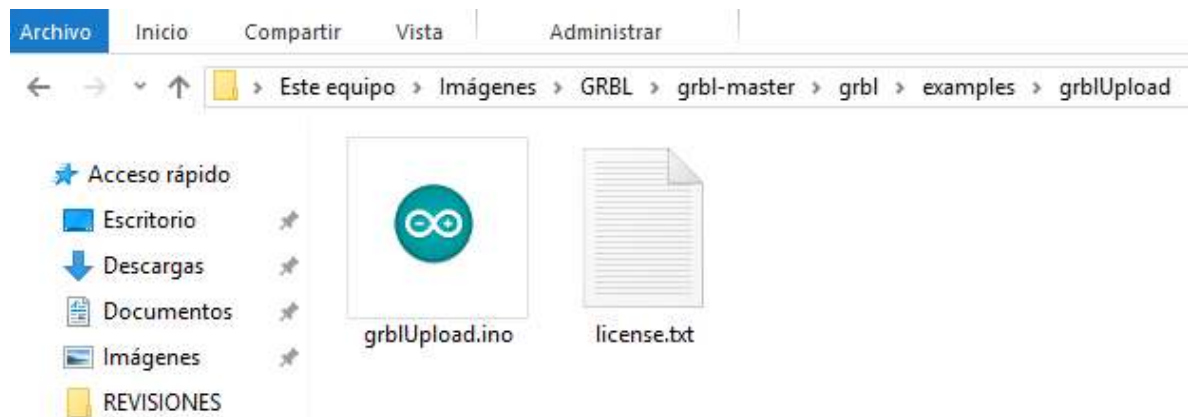
Se pasa conectar el arduino y verificar que lo esté reconociendo la computadora.



3. Ubicar el archivo ejecutable

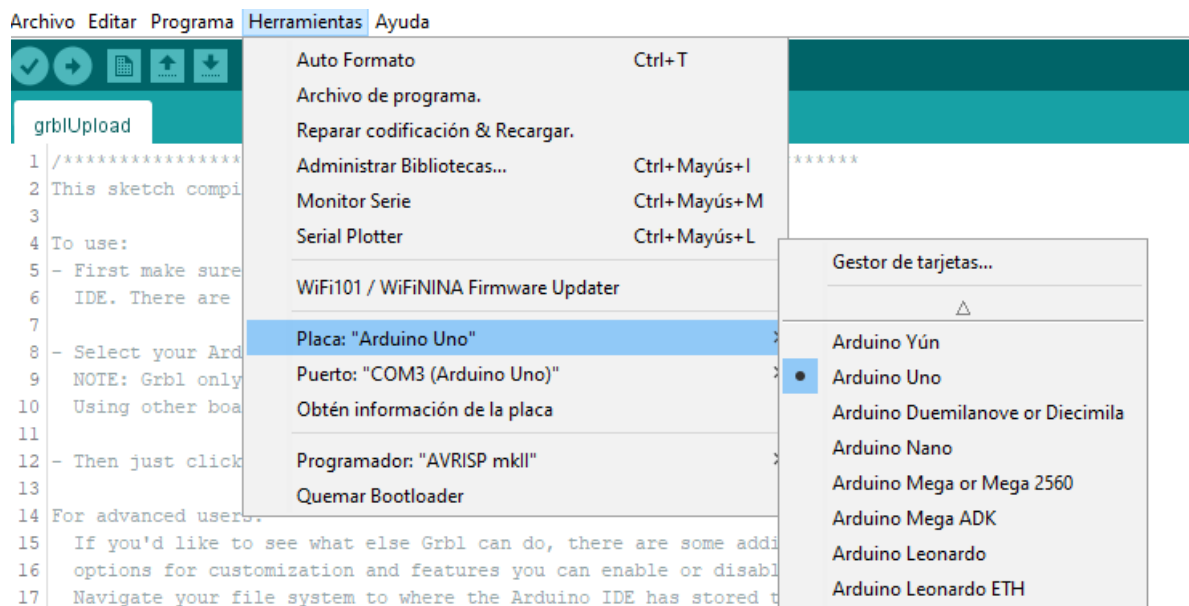
Después de que la computadora haya reconocido el arduino, se pasa a descomprimir el archivo zip.

Una vez descomprimido entrar a la carpeta principal, entrar a la carpeta a la llamada “grbl” y encontrar el archivo que se cargará al arduino.



4. Cargar el firmware

Una vez ubicado el archivo se ejecuta el archivo y se abrirá el entorno de arduino, estando ahí se pasa a seleccionar el arduino conectado y sin realizar ninguna modificación al programa se pasará a cargarlo.



5. Modificación al programa

Debido a que se realizó el filtro pasa bajas para la correcta lectura de las entradas de los interruptores de límite y la del sondeo (sistema de autonivelamiento), es necesario hacer una modificación en los pines del arduino donde se detectan estas entradas. Esta modificación consiste en deshabilitar las resistencias de “pull up” de los pines mencionados.

Para esto es necesario entrar en la carpeta llamada “grbl”, encontrar el archivo llamado “config.h” y descomentar las líneas de código que indican esta acción.

```
231 // normal-open switch and vice versa.
232 // NOTE: All pins associated with the feature are disabled, i.e. XYZ limit pins, not individual axes.
233 // WARNING: When the pull-ups are disabled, this requires additional wiring with pull-down resistors!
234 #define DISABLE_LIMIT_PIN_PULL_UP ///////////////////////////////////////////////////////////////////DESCOMENTADA////////////////////////////////////,
235 #define DISABLE_PROBE_PIN_PULL_UP ///////////////////////////////////////////////////////////////////DESCOMENTADA////////////////////////////////////,
236 //#define DISABLE_CONTROL_PIN_PULL_UP
237
238 // Sets which axis the tool length offset is applied. Assumes the spindle is always parallel with
239 // the selected axis with the tool oriented toward the negative direction. In other words, a positive
240 // tool length offset value is subtracted from the current location.
241 #define TOOL_LENGTH_OFFSET_AXIS Z_AXIS // Default z-axis. Valid values are X_AXIS, Y_AXIS, or Z_AXIS.
242
```

Bibliografía

- [1] J. Rivas, «Programación de CNC con lenguaje ISO (Fagor 8070),» [En línea]. Available: <https://disenyproducte.blogspot.com/2016/07/programacion-de-cnc-con-lenguaje-iso.html>. [Último acceso: 30 Octubre 2019].
- [2] F. D. E. S. CUAUTITLÁN, «PROGRAMACIÓN AUTOMÁTICA DE MAQUINAS,» [En línea]. Available: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m4/master_cam.pdf. [Último acceso: 30 Octubre 2019].
- [3] Catedras, [En línea]. Available: <https://catedras.facet.unt.edu.ar/e1/wp-content/uploads/sites/124/2018/04/Tema-4-1.pdf>. [Último acceso: 15 Diciembre 2020].
- [4] Wim Provoost, «GRBL,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/provoniel/cnc-pcb-milling/grbl>. [Último acceso: 21 Noviembre 2019].
- [5] Autodesk, «Diseño de circuitos impresos sencillo,» [En línea]. Available: <https://www.autodesk.mx/products/eagle/overview>. [Último acceso: 2019 Diciembre 03].
- [6] Groups.io, «#pcbrcode,» 11 Abril 2018. [En línea]. Available: <https://groups.io/g/pcbrcode/topic/27832860?p=Created,,,20,2,0,0::recentpostdate%2Fsticky,,,20,2,0,27832860>. [Último acceso: 03 Abril 2019].
- [7] GRUMEBER, «Mecanizado CNC ¿Qué es?,» [En línea]. Available: <https://www.grumeber.com/mecanizado-que-es/>. [Último acceso: 30 Octubre 2019].
- [8] MECANIZADOS SINC, «Qué es el CNC – control numérico por computadora,» 23 Junio 2015. [En línea]. Available: <https://www.mecanizadossinc.com/cnc-control-numerico-por-computadora/>. [Último acceso: 30 Octubre 2019].
- [9] mundocompresor.com, «CNC (control numérico por computadora),» [En línea]. Available: <https://www.mundocompresor.com/diccionario-tecnico/cnc>. [Último acceso: 30 Octubre 2019].

- [10] Industrias&Empresas, «Historia y evolución del CNC,» 16 Julio 2014. [En línea].
Available: <http://industriasyempresas.com.ar/node/2088>.
[Último acceso: 16 Agosto 2019].
- [11] FORESTAL MADERERO, «La historia del CNC (control numérico por computadora),» 30 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.forestmaderero.com/articulos/item/la-historia-del-cnc-control-numerico-por-computadora.html>.
[Último acceso: 30 Octubre 2019].
- [12] ALMA DE HERRERO, «Las primeras máquinas herramienta de control numérico,» 18 Julio 2013. [En línea]. Available: <http://almadeherrero.blogspot.com/2013/07/las-primeras-maquinas-herramienta-de.html>. [Último acceso: 20 Octubre 2019].
- [13] 3D CAD Portal, «CONTROL NUMERICO,» [En línea]. Available:
<http://www.3dcadportal.com/control-numerico.html>. [Último acceso: 30 Octubre 2019].
- [14] DE MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS, «Introducción a la tecnología CNC,» 28 Diciembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/introduccion-a-la-tecnologia-cnc>. [Último acceso: 30 Octubre 2019].
- [15] Slideshare, «Generalidades sist cnc complemento,» 24 Octubre 2011. [En línea].
Available: <https://pt.slideshare.net/elymesa/generalidades-sist-cnc-complemento-9860662/4?smtNoRedir=1>. [Último acceso: 30 Octubre 2019].
- [16] jmp technological, «Manual CNC / simulador jmp,» [En línea]. Available:
http://www.jmptechnological.com/manual_cnc/cotas_incrementales.php.
[Último acceso: 22 Agosto 2019].
- [17] CASIOPEA, «Introducción al control numérico computarizado (CNC),» 09 Julio 2018.
[En línea]. Available: [https://wiki.ead.pucv.cl/Introducci%C3%B3n_al_control_num%C3%A9rico_computarizado_\(CNC\)](https://wiki.ead.pucv.cl/Introducci%C3%B3n_al_control_num%C3%A9rico_computarizado_(CNC)). [Último acceso: 30 Octubre 2019].
- [18] PLANES, «El mecanizado CAM: qué es y qué ventajas aporta,» 11 Diciembre 2017.
[En línea]. Available: <https://ferrospanes.com/mecanizado-cam/>.

- [Último acceso: 30 Octubre 2019].
- [19] Wikipedia, «Control numérico directo,» 19 Agosto 2019. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Direct_numerical_control.
[Último acceso: 30 Octubre 2019].
- [20] MÁQUINACNC.COM, «Tipos de máquinas CNC,» [En línea]. Available: <https://maquinacnc.com/tipos/>. [Último acceso: 30 Octubre 2019].
- [21] Tecnología Mecánica, «CONTROL NÚMERICO,» 24 Julio 2019. [En línea]. Available: http://www.sitenordeste.com/mecanica/control_numerico.htm.
[Último acceso: 30 Octubre 2019].
- [22] D. d. E. F. d. I. U. N. d. L. Plata, «SISTEMAS DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO (SCNC),» La Plata.
- [23] FABRICACIÓN ASISTIDA POR COMPUTADOR, «Tema 6. ACCIONAMIENTOS Y SENSORES,» 2016. [En línea]. Available: <https://docplayer.es/11585441-Tema-6-accionamientos-y-sensores.html>. [Último acceso: 22 Agosto 2019].
- [24] Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado (UCLA), «Accionamiento eléctrico y mecánico, Tesinas de Mecánica,» 28 Julio 2018. [En línea]. Available: <https://www.docsity.com/es/accionamiento-electrico-y-mecanico/4089308/>.
[Último acceso: 30 Agosto 2019].
- [25] GLDMA Ma'anshan Gilde CNC Machine Tool Co.,Ltd, «¿Se puede usar un cilindro hidráulico digital en una máquina dobladora CNC?,» [En línea]. Available: <http://es.gldma.com/can-a-digital-hydraulic-cylinder-be-used-on-a-cnc-bending-machine.html>. [Último acceso: 20 Agosto 2019].
- [26] the fabricator, «Máquinas verdes,» 21 Julio 2009. [En línea]. Available: <https://www.thefabricator.com/thefabricatorenespanol/article/bending/maquinas-verdes>. [Último acceso: 01 Octubre 2019].

- [27] Ingemecánica, «Sistemas Hidráulicos de Transmisión de Potencia,» [En línea].
Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn212.html>.
[Último acceso: 01 Noviembre 2019].
- [28] WIKIPEDIA, «Motor hidráulico,» 22 Octubre 2019. [En línea].
Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_hidr%C3%A1ulico.
[Último acceso: 01 Noviembre 2019].
- [29] AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL, «Elementos de Fuerza: Cilindros y Motores Neumáticos,» 04 Septiembre 2010. [En línea]. Available: <http://industrial-automatica.blogspot.com/2010/09/elementos-de-fuerza-cilindros-y-motores.html>.
[Último acceso: 01 Noviembre 2019].
- [30] E-ducativa, «Actuadores neumáticos,» [En línea]. Available: http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1108/html/3_actuadores_neumticos.html.
[Último acceso: 01 Noviembre 2019].
- [31] algotecnologic, «Cilindros de Simple y de Doble,» 20 Mayo 2013. [En línea].
Available: <https://algotecnologic.wordpress.com/2013/05/20/cilindros-de-simple-y-de-doble/>. [Último acceso: 01 Noviembre 2019].
- [32] INSUMOS & SERVICIOS INTERNACIONALES, «DATOS GENERALES BOMBAS Y MOTORES HIDRAULICOS,» 23 Diciembre 2015. [En línea].
Available: <http://insumosintl.com/2015/12/23/algunos-datos-generales-sobre-las-bombas-y-motores-hidraulicos/>. [Último acceso: 01 Noviembre 2019].
- [33] Prezi, «Sistema de control numerico directo,» 5 Septiembre 2013. [En línea].
Available: <https://prezi.com/f3bbuoi-md6w/sistema-de-control-numeric-directo/>.
[Último acceso: 30 Octubre 2019].
- [34] Mecánica, «Motores de una máquina CNC,» 2013. [En línea].
Available: <https://www.cnccontrolapp.com/motores.html>.

- [Último acceso: 02 Noviembre 2019].
- [35] Ingeniería Mecafenix, «Motor paso a paso ¿que es y como funciona?,» 20 Abril 2017.
[En línea]. Available: <https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/motor-paso-a-paso/>. [Último acceso: 02 Noviembre 2019].
- [36] Ingeniería Mecafenix, «Servomotor ¿Que es y como funciona?,» 18 Abril 2017.
[En línea]. Available: <https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/servomotor/>.
[Último acceso: 02 Noviembre 2019].
- [37] T°BEM, «¿Como funcionan los servomotores?,» 2019 Junio 5. [En línea].
Available: <https://teslabem.com/blog/como-funcionan-los-servomotores/>.
[Último acceso: 02 Noviembre 2019].
- [38] PANAMAHITEK, «¿Qué es y cómo funciona un servomotor?,» 02 Diciembre 2016.
[En línea]. Available: <http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-servomotor/>.
[Último acceso: 02 Noviembre 2019].
- [39] ORACLE, «Robótica Móvil: Control de motores de paso con Java SE Embedded en la plataforma Raspberry Pi,» Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://www.oracle.com/technetwork/es/articles/java/control-motores-java-raspberry-pi-2927611-esa.html>.
[Último acceso: 02 Noviembre 2019].
- [40] CNC DIY, «TEMA 2.- PARTES DE UN SISTEMA CNC,» 09 Abril 2017.
[En línea]. Available: <https://cncdiyblog.wordpress.com/2017/04/09/partes-de-un-sistema-cnc/>. [Último acceso: 20 Octubre 2019].
- [41] SlideShare, «Cnc,» 5 Mayo 2014. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/Procesos-Manufactura/cnc-34312272>. [Último acceso: 22 Octubre 2019].
- [42] infoAgro, «FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DEL RIEGO Y LA

- FERTILIZACIÓN,» [En línea]. Available: https://www.infoagro.com/riegos/control_riego_y_fertilizacion.htm. [Último acceso: 02 Noviembre 2019].
- [43] MAKINANDO, «Sistemas de control de lazo abierto y de lazo cerrado,» 08 Febrero 2018.
[En línea]. Available: <https://makinandovelez.wordpress.com/2018/02/08/sistemas-de-control-de-lazo-abierto-y-de-lazo-cerrado/>. [Último acceso: 02 Noviembre 2019].
- [44] GRUPO CARMAN, «Tipos de control numérico parte I,» 5 Noviembre 2015.
[En línea]. Available: <https://grupocarman.com/blog/tipos-de-control-numerico-parte-i/>. [Último acceso: 20 Agosto 2019].
- [45] D. d. E. F. d. I. U. N. d. I. Plata, «Cero fijo y cero flotante,» *SISTEMAS DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO (SCNC)*, pp. 3-4, 2011.
- [46] Slideshare, «Cnc 002,» 7 Octubre 2015. [En línea]. Available: <https://pt.slideshare.net/AriadneBC/cnc-002-53665905>. [Último acceso: 20 Agosto 2019].
- [47] Prezi, «Clasificacion De Los Controles Numericos,» 29 Agosto 2014. [En línea]. Available: <https://prezi.com/unpzh5vqd2g0/clasificacion-de-los-controles-numericos/>. [Último acceso: 02 Noviembre 2019].
- [48] PROBOTIX, «Isolated Parallel Port CNC Breakout Board,» [En línea]. Available: https://www.probotix.com/manuals/PBX-RF_manual.pdf. [Último acceso: 10 Noviembre 2019].
- [49] PLUSELECTRIC, «Arduino Uno: Especificaciones y características,» 21 Septiembre 2014.
[En línea]. Available: <https://pluselectric.wordpress.com/2014/09/21/arduino-uno-especificaciones-y-caracteristicas/>. [Último acceso: 10 Noviembre 2019].
- [50] AliExpress, «Daedalus 500w de husillo motor refrigerado por aire,» [En línea]. Available: <https://es.aliexpress.com/item/32948796164.html?spm=a2g0o.productlist.0.0>.

- 17b8725bQu8m5Q&s=p&algo_pvid=e1a262ad-a3a9-44d3-92dd-5ad927e84200&algo_expid=e1a262ad-a3a9-44d3-92dd-5ad927e84200-4&btsid=e0c88f34-1d1d-4637-bf1f-43fa215d fae1&ws_ab_test=searchweb0_. [Último acceso: 15 Noviembre 2019].
- [51] U. D. L. P. d. G. Canaria, «Filtros Activos,» [En línea].
Available: <https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/29/29861/filtros.pdf>.
[Último acceso: 15 Noviembre 2019].
- [52] Micro JPM, «TL084 Amplificador Operacional Cuádruple J-FET,»
[En línea]. Available: <http://m.microjpm.com/products/tl084-amplificador-operacional-cuadruple-j-fet/>. [Último acceso: 15 Noviembre 2019].
- [53] GitHub, «Connecting Grbl,» 24 Abril 2017. [En línea]. Available: <https://github.com/grbl/grbl/wiki/Connecting-Grbl>. [Último acceso: 15 Noviembre 2019].
- [54] GitHub, «About Grbl,» 01 Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://github.com/gnea/grbl/wiki>. [Último acceso: 21 Noviembre 2018].
- [55] GitHub, «bCNC,» [En línea]. Available: <https://github.com/vlachoudis/bCNC>.
[Último acceso: 25 Noviembre 2019].
- [56] TEXOLAB, «bCNC Software libre para control de tu CNC con GRBL + arduino,»
[En línea]. Available: <https://texolab.net/2017/12/10/bcnc-software-libre-control-cnc-grbl-arduino/>. [Último acceso: 25 Noviembre 2019].
- [57] AliExpress, «MICRO SWITCH KW3-0Z,» [En línea]. Available:
https://es.aliexpress.com/item/32957378387.html?spm=a219c.search0302.3.57.52205a02oPpFRVx&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_0,searchweb201603_0,ppcSwitch_0&algo_pvid=6ef0ab40-ff66-4197-9247-c432c7ebb44d&algo_expid=6ef0ab40-ff66-4197-9247-c432c7ebb44d. [Último acceso: 28 Noviembre 2019].
- [58] Indiamart, «Microinterruptor Siemens de 10 amperios, para máquina,» [En línea].
Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/micro-switch-16915554630.html>.
[Último acceso: 28 Noviembre 2019].

- [59] Newark, «E22B1 - Bloque de Contactos, 10 A, 600 V, 1 Polo, 1NC,» [En línea].
Available: <https://mexico.newark.com/eaton-cutler-hammer/e22b1/contact-block-1nc-10a-screw/dp/46K9327#anchorTechnicalDOCS>.
[Último acceso: 28 Noviembre 2019].
- [60] Wikipedia, «Cura (software),» 10 Julio 2019. [En línea].
[Último acceso: 19 Noviembre 2011].
- [61] Autodesk, «Fusion 360,» [En línea]. Available: <https://www.autodesk.com/education/free-software/fusion-360-for-educational-institutions>.
[Último acceso: 19 Noviembre 2019].
- [62] ALL ABOUT CIRCUITS, «Extienda la herramienta EAGLE CAD con ULP: escriba su primer programa de lenguaje de usuario,» 22 Junio 2017. [En línea].
Available: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/extend-eagle-cad-tool-with-ulps-writing-your-first-user-language-progr/>.
[Último acceso: 04 Diciembre 2019].
- [63] PCB Central, «Lección #2: EAGLE Autodesk: Software para diseñar Circuitos Impresos,» 12 Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://pcbcentral.com/eagle-autodesk>. [Último acceso: 04 Diciembre 2019].
- [64] PCB Central, «Lección #1: Tarjeta de Circuito Impreso – Definiciones y Terminología Utilizada parte I,» 14 Febrero 2018. [En línea].
Available: <https://pcbcentral.com/tarjeta-de-circuito-impreso-definiciones-y-terminologia-utilizada-parte-i>. [Último acceso: 04 Diciembre 2019].
- [65] PROBOTIX, «ProboStepVX,» 29 Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.probotix.com/wiki/index.php/ProboStepVX>.
[Último acceso: 11 Diciembre 2019].
- [66] Pinterest, «Descubre ideas sobre Motor Paso A Paso,» [En línea]. Available: <https://www.pinterest.com.mx/pin/244953667210326189/>.
[Último acceso: 11 Diciembre 2011].

- [67] PROBOTIX, «HT23-420-8,» 08 Marzo 2018. [En línea]. Available: https://www.probotix.com/wiki/index.php/HT23-420-8#GREEN_MONSTER_420_OZ.2FIN_Stepper_Motor.
[Último acceso: 11 Diciembre 2011].
- [68] EcuRed, «Filtro pasa bajos,» [En línea]. Available: https://www.ecured.cu/Filtro_pasa_bajos. [Último acceso: 2020 Febrero 24].
- [69] Blogger, «Circuit Board Builder,» 04 Diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://pcbsoftware.blogspot.com/search/label/eagle%20pcb%20layout%20software%20free%20download>. [Último acceso: 26 Febrero 2020].