ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

AUTOMATIZACIÓN DE UNA MÁQUINA FRESADORA MEDIANTE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO

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

EDWIN DAVID FREILE ARAUZ
edwindavidf@yahoo.com

DIRECTOR: Nelson Sotomayor Orozco, MSc.
nsotomayor@hotmail.com

Quito, Abril 2009

DECLARACIÓN

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

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

_____

Edwin David Freile Arauz

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Edwin David Freile Arauz, bajo mi supervisión.

_____

Nelson Sotomayor, MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Nelson Sotomayor Orozco quien desinteresadamente dirigió este proyecto de titulación.

Al Ingeniero Patricio Chico y a la Ingeniera Silvana Gamboa por haber brindado sus conocimientos en microcontroladores PIC.

A la empresa TechDesign por haber dado total apoyo económico para el desarrollo del proyecto.

Al Ingeniero Andrés Freile por la instrucción y guía en la parte mecánica del proyecto.

DEDICATORIA

A Dios por haberme creado, a mis padres por haberme educado y apoyado incondicionalmente, a mi hermano Andrés por haberme guiado en el ámbito laboral, a mi familia por ser lo más importante que tengo en mi vida y a todos los que conformamos la mejor universidad técnica del Ecuador.

CONTENIDO

RESUMEN…… viii

PRESENTACIÓN…… ix

CAPÍTULO 1: FUNDAMENTOS BÁSICOS…… 1

1.1 INTRODUCCIÓN…….. 1

1.2 MÁQUINAS SIMILARES……..…….. 2
1.2.1 BRUTE II……...……...……...…….. 2
1.2.2 MÁQUINA FRESADORA CNC GSK XJK6325A……..……..3

1.3 CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO CNC……..…….. 4
1.3.1 DEFINICIÓN…..……...……...……...…….. 4
1.3.2 CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO...……..5
1.3.3 COMPONENTE HUMANO……...……..5
1.3.4 MÁQUINAS HERRAMIENTAS CNC...……...……..5
1.3.4.1 ELEMENTOS DE LAS MÁQUINAS HERRAMIENTAS DE CONTROL NUMÉRICO….. 6
1.3.4.2 PRINCIPIOS DE MECANIZADO EN CONTROL NUMÉRICO……..…...22
1.3.4.3 EJES DE COORDENADAS EN CONTROL NUMÉRICO……..……..…...24
1.3.4.4 PROGRAMACIÓN DE CONTROL NUMÉRICO……..……..…….…... 26

1.4 SENSORES Y ACTUADORES……..…..……..34
1.4.1 SENSOR DE PROXIMIDAD INDUCTIVO……...……..34
1.4.2 ENCODER ROTATIVO INCREMENTAL…….……...…….. 35
1.4.3 MOTOR PASO A PASO…….…….……...…….. 37
1.4.4 SERVO MOTOR AC……..…….…….……...…….. 38
1.4.5 MOTOR DE INDUCCIÓN...…..…….…….……...……..39

CAPÍTULO 2: DISEÑO DEL SISTEMA…….. 41

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL...……41

2.2 SISTEMA ELÉCTRICO…… 43
2.2.1 CIRCUITO DE CONTROL 1 (VISUALIZACIÓN/CORRIENTE)……..44
2.2.1.1 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL DE REFERENCIA, VISUALIZACIÓN LED, CIRCUITO DEL MICROCONTROLADOR…… 44
2.2.1.2 CIRCUITO DE BARRIDO DE DISPLAYS……...47
2.2.1.3 ACONDICIONAMIENTO PARA SENSADO DE CORRIENTE……50
2.2.2 CIRCUITO DE CONTROL 2 (POSICIÓN)……..53
2.2.2.1 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES A Y B DE ENCODER, VISUALIZACIÓN LED, CIRCUITO DEL MICROCONTROLADOR……53
2.2.2.2 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES PULSOS, DIRECCIÓN Y HABILITACIÓN……56
2.2.2.3 FUENTE DE ALIMENTACIÓN…… 58
2.2.3 CIRCUITO DE POTENCIA……..58
2.2.4 CIRCUITO INTERFAZ 1 (PC-CONTROL)……63
2.2.4.1 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL PROVENIENTE DEL COMPUTADOR

HACIA EL CIRCUITO DE CONTROL 2……..... 63
2.2.4.2 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL PROVENIENTE DEL COMPUTADOR HACIA EL SERVO CONTROLADOR……..66
2.2.5 CIRCUITO INTERFAZ 2 (PC-ELEMENTOS EXTERNOS)…….. 71
2.2.5.1 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL PROVENIENTE DEL COMPUTADOR PARA MANEJAR RELÉS Y UNA SALIDA DE TIPO PWM..……70
2.2.5.2 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL PROVENIENTE DE UN ELEMENTO EXTERNO TIPO CONTACTO HACIA EL COMPUTADOR……..77
2.2.5.3 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL PROVENIENTE DEL CONTROLADOR DEL MOTOR DE PASOS PARA MANEJAR UN RELÉ A TRAVÉS DE UN CIRCUITO DE RETARDO A LA CONEXIÓN……...81
2.2.5.4 FUENTE DE ALIMENTACIÓN…… 86
2.2.6 FUENTE PARA MOTORES PASO A PASO……...87
2.2.7 CONEXIÓN DE RELÉS DE CONTROL…… 88

2.3 SISTEMA MECÁNICO……..90

2.4 CARACTERÍSTICAS DE EQUIPOS……... 92
2.3.1 SERVO DRIVE GSK DA98D…….... 92
2.3.2 VARIADOR DE FRECUENCIA EATON MVX9000……..103

CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE PROGRAMA DE CONTROL.... 108

3.1 PROGRAMA PARA LOS MICROCONTROLADORES PIC…….. 108
3.1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL…….. 108
3.1.2 DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CONTROL DE POSICIÓN……...…….. 108
3.1.2.1 CONFIGURACIÓN……...…… 109
3.1.2.2 PROGRAMA PRINCIPAL……..……...……110
3.1.2.3 INTERRUPCIÓN……...……..……...……113
3.1.2.4 SUBRUTINA RESTA 16 BITS…..…...……115
3.1.2.5 SUBRUTINA PWM……..…..……...……115
3.1.3 DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROGRAMA DE CONTROL DE POSICIÓN……...…….. 115
3.1.3.1 PROGRAMA PRINCIPAL……..……...……116
3.1.3.2 INTERRUPCIÓN……...……..……...……123
3.1.3.3 SUBRUTINA RESTA 16 BITS…..…...……131
3.1.3.4 SUBRUTINA PWM……..…..……...……132
3.1.4 DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CONTROL DE CORRIENTE…….……...…….. 132
3.1.4.1 CONFIGURACIÓN……...…… 133
3.1.4.2 PROGRAMA PRINCIPAL……..……...……134
3.1.4.3 SUBRUTINA AD……...……..……...……134
3.1.4.4 INTERRUPCIÓN……...……..……...……135
3.1.5 DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROGRAMA DE CONTROL DE CORRIENTE…….……...…….. 136
3.1.5.1 PROGRAMA PRINCIPAL……..……...……136
3.1.5.2 SUBRUTINA AD……...……..……...……138
3.1.5.3 INTERRUPCIÓN……...……..……...……139

3.2 PROGRAMA INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA……..139
3.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL…….. 139
3.2.2 DESARROLLO DEL PROGRAMA HMI…...…….. 140
3.2.3 DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROGRAMA HMI…...……...…….. 142
3.2.3.1 FORMULARIO PRINCIPAL…..……...…… 143
3.2.3.2 OBJETO NX……...……..……...……143
3.2.3.3 OBJETO BOBCAD-CAM.……..……...…… 143
3.2.3.4 OBJETO MACH3MILL.....……..……...……144

3.2.3.5 OBJETO SALIR..……...…….……...…… 144

CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS…… 145

4.1 CONTADOR INCREMENTAL / DECREMENTAL……..145

4.2 CONTROL EN LAZO ABIERTO DE UN MOTOR DE PASOS…….……..146

4.3 CONTROL EN LAZO CERRADO…….……... 148

4.4 SISTEMA MICROPROCESADO……..…….……... 151

4.5 SISTEMA FINAL…….…….……... 154

4.6 LISTADO DE ELEMENTOS Y COSTO…..…….…….……..167

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES...…..… 173

5.1 CONCLUSIONES…….…….. 173

5.2 RECOMENDACIONES...…….. 174

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS……...…..… 175

ANEXOS

RESUMEN

Este proyecto de titulación trata de la automatización de una máquina fresadora, que utiliza un sistema de control numérico computarizado, desde el software de diseño CAD (Computer Aided Design – Diseño Asistido por Computador) hasta el software de control CNC (Computer Numerical Control – Control Numérico Computarizado) y manufactura CAM (Computer Aided Manufacturing – Fabricación Asistida por Computador).

El proyecto contempla el diseño e implementación de un sistema microprocesado para controlar motores paso a paso a utilizar en la máquina CNC, además de interfases electrónicas para controlar desde la PC un servo-drive para motor trifásico, un variador de velocidad para motor trifásico, relés, finales de carrera, así como señales de entrada y salida tipo contacto y pulso.

También se considera el desarrollo de un HMI (Interfaz Hombre Máquina), el cual realiza la acción de llamar a los correspondientes programas de diseño y control CAD – CAM – CNC.

Con esta máquina fresadora CNC de tres ejes de desplazamiento se puede fabricar automáticamente un elemento mecánico diseñado en un paquete CAD comercial y software CAM, CNC comerciales tales como Solid Edge, Inventor, NX, BodCAD-CAM, NX CAM, KCAM, Mach 3, o similares, previa reconfiguración del sistema.

Adicionalmente se puede verificar las dimensiones de la pieza mecánica, ya que dentro del sistema microprocesado se consideró la visualización del desplazamiento en milímetros de los ejes X y Y, para el eje Z se utilizó un servo-drive que posee la opción de visualización del desplazamiento.

Este proyecto también contempla la implementación de un tablero de control que contiene: los circuitos controladores, de potencia, interfases, fuentes de alimentación, servo-drive, variador de velocidad y elementos de protección y maniobra.

PRESENTACIÓN

Hoy en día se encuentra un entorno lleno de expectativas así como de incertidumbre, la cual se da por los cambios casi imperceptibles en la tecnología, cambios que no permiten aprovecharla de una manera apropiada. Así también se manifiestan cambios en el ámbito político y económico que en países en desarrollo como el nuestro impiden solucionar problemas empleando ideas propias.

Una solución a esta realidad es la automatización de las industrias que eventualmente debe incorporar las nuevas tecnologías, claro que se debe hacer en un tramo de tiempo conveniente y tomando en cuenta factores importantes como capacidad de producción y rendimiento de la inversión. Uno de los componentes principales de la automatización es la maquinaria de control numérico computarizado ya que poseen muy buenas prestaciones, tales como: flexibilidad, precisión, rapidez e incremento de la productividad.

El presente trabajo se encuentra distribuido de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se detallan los fundamentos básicos del control numérico computarizado, además se hace referencia a máquinas de características similares, también se da una breve explicación de los sensores y actuadores que se utilizan en el proyecto.

En el capítulo 2 se especifica el diseño electrónico del sistema, asimismo se detallan las partes del conjunto mecánico y por último se presentan características y uso de equipos.

En el capítulo 3 se desarrolla el software para cada dispositivo programable así como la programación del HMI.

En el capítulo 4 se explican las pruebas realizadas durante el proceso de desarrollo del sistema y los resultados parciales, al final se muestran dos pruebas

para comprobar el sistema total y los resultados finales; este capítulo incluye los costos de la máquina.

En el capítulo 5 se puntualizan las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

En el apartado de anexos se incluyen, el manual de usuario de la máquina, las hojas de datos de elementos especiales y los planos de montaje del sistema eléctrico.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS BÁSICOS

1.1 INTRODUCCIÓN

El control numérico aplicado a una máquina herramienta como una fresadora o un torno, transforma la máquina convencional que trabaja prácticamente de forma manual en una más sofisticada con un porcentaje de automatización bastante alto, esto se debe a que se utilizan controladores y actuadores eléctricos o electrónicos, por ejemplo controladores como un computador o un sistema de control numérico computarizado (CNC), también actuadores eléctricos como servo motores trifásicos.

El trabajo del control numérico es el siguiente: empieza por el diseño asistido por computador (CAD), elaborando un elemento mecánico por ejemplo un molde, una matriz etc, luego utilizando otro software para fabricación asistida por computador (CAM), se transforma la información de diseño en información de trayectorias espaciales, la cual está compuesta de varias líneas de código conocidas como código G; el siguiente paso es utilizar otro software (CNC) que convierte estas líneas de código en señales eléctricas que serán las encargadas de hacer trabajar a la máquina, como resultado se obtiene un elemento mecánico de manera casi automática.

A pesar que el desenvolvimiento tecnológico de las máquinas de control numérico es relativamente reciente, provocaron un impulso positivo en la industria a tal grado que no se podría imaginar un futuro industrializado sin las mismas.

Esto se debe principalmente a la calidad de las piezas fabricadas y a la velocidad de trabajo de los elementos de la máquina herramienta, lo cual sorprende incluso a los que tienen conocimientos en el campo de la mecánica.

Aunque estas máquinas herramientas son controladas por un computador, el sistema total en sí, integra elementos hidráulicos, neumáticos, eléctricos, electrónicos y mecánicos [1].

Dentro de las ventajas que posee el control numérico sobre otras formas de mecanizado, se pueden mencionar las siguientes: posee un grado de precisión bastante alto; independencia casi total de un operador; disminución de desperdicios en cuanto a materia prima debido a la reducción de errores humanos; se minimiza el tiempo requerido para examinar la pieza elaborada; se puede desarrollar piezas complejas; se mejora el tiempo de producción; otra ventaja es la flexibilidad, ya que para fabricar otro tipo de pieza solo se requiere cambiar el programa de control [2].

Frente a estos atributos se pueden mencionar algunas desventajas: debido a la tecnología que representa una máquina de control numérico, su costo inicial es un poco elevado; además se requiere de capacitación al personal que maneja este tipo de maquinaria [2].

1.2 MÁQUINAS SIMILARES

1.2.1 BRUTE II [3]

Esta máquina es de construcción casera, utiliza perfiles de ventana de aluminio como material principal; utiliza el controlador de pasos Perf-X y un circuito de potencia con chips como L297 y TIP120.

Con una velocidad máxima de 20 pulgadas por minuto, utiliza una fuente de 30VDC, esta máquina puede maquinar en PVC, plexiglas, cera y madera a velocidades altas; en cambio a bajas velocidades y poca profundidad de corte puede fresar latón y aluminio, las dimensiones máximas de la pieza a mecanizar son 5 ¾ pulgadas en el eje X y Y, para el eje Z se tiene 2 ½ pulgadas.

Figura 1.1 Brute II máquina fresadora y ruteadora de circuitos impresos, tomado de [3]

1.2.2 MÁQUINA FRESADORA CNC GSK XJK6325A [4]

Esta máquina es industrial y se diferencia de las máquinas fabricadas en casa por los materiales que la constituyen, además de las prestaciones que posee; su estructura es de acero o hierro fundido comúnmente y puede mecanizar materiales suaves como madera hasta los más duros como acero, es decir cualquier material que presente una carga máxima en la mesa de trabajo de 200 kg.

En cuanto a las dimensiones de la mesa de trabajo tiene un área de 250x1120 mm, con la cual se tiene un desplazamiento máximo en X, Y, Z de 600, 220, 110 mm; la potencia del motor acoplado al husillo principal es de 1.7 kW, asimismo se tiene control de su velocidad en un rango de 65 a 4760 rpm; otra característica importante es la posibilidad de girar el cabezal de fresado 45 ó 90º, si algún trabajo de mecanizado lo requiere. En cuanto al controlador numérico posee un sistema CNC GSK983M / 928MA / 218M / DA98.

Como se puede apreciar, las ventajas que presenta una máquina herramienta fresadora CNC industrial son mayores frente a una fabricada en casa o incluso a una máquina fresadora convencional, la única desventaja sería su costo inicial.

Figura 1.2 Máquina fresadora CNC GSK XJK6325A, tomado de [4]

1.3 CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO (CNC)

1.3.1 DEFINICIÓN

CNC quiere decir, control de una máquina herramienta a través de un código numérico, el cual puede ser efectuado por un controlador específico o un computador utilizando un software para control numérico [2].

El control numérico computarizado surge con la creación de los microprocesadores, lo cual es una gran ventaja frente a las máquinas anteriores de control numérico que no lo poseían, ya que los códigos de programa pueden ser desarrollados así como guardados en la misma máquina, descartando inconvenientes de operación. Este tipo de máquinas herramienta presentan un

grado de flexibilidad muy alto debido a su control digital lo cual facilita la integración de módulos personalizados.

1.3.2 CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO

Con una máquina herramienta CNC, se obtiene un producto final de calidad superior, debido a su fácil control, alta precisión y flexibilidad en cuanto a modificaciones en el concepto de la pieza a fabricar; dando la posibilidad de elaborar piezas complejas de manera sencilla; inclusive, el proceso de corte puede ser simulado con el propósito de constatarlo. Ya que este tipo de máquinas son prácticamente automáticas, un solo operador que puede o no tener experiencia en el manejo de maquinaria CNC, está en capacidad de manipular algunas máquinas al mismo tiempo, haciendo más segura su labor y menos fatigante. Debido a que la línea de producción se hace más uniforme, se facilita el control de calidad del producto, se reduce costos de inventario, traslado, fabricación; incluso se puede entregar el producto casi inmediatamente si así lo requiere la demanda; esto permite administrar el proceso de producción de manera asequible [5].

1.3.3 COMPONENTE HUMANO

Si bien es cierto que la maquinaria de control numérico computarizado es prácticamente automática el operador debe reunir algunas aptitudes y poseer instrucción básica previa, como, álgebra, geometría, trigonometría; tipos de herramientas para corte; métodos de sujeción; apreciación de planos; instrucción de la configuración de la máquina, del procedimiento de mecanizado, de programación en código G (en la mayoría de los casos), operación y mantenimiento.

1.3.4 MÁQUINAS HERRAMIENTAS CNC

Este tipo de maquinaria es muy utilizada ya que es flexible y programable dependiendo de la demanda; debido a la complejidad de los productos que se

fabrican con este tipo de máquinas en la mayoría de los casos, la cantidad de producción es relativamente media o baja, pero la ventaja es que se elaboran de manera automática, eliminando la posibilidad de realizar ajustes en tiempo real por un especialista. Comúnmente no se las encuentra incluidas en un proceso continuo de producción, pero si se realiza algún tipo de adaptación mecánica se pueden interconectar para agilizar el proceso, conociéndolo como célula de fabricación, donde el manejo de materiales sea una operación ejecutada por un brazo robot por ejemplo.

También se puede encontrar máquinas de control numérico con sistemas de cambio de herramientas automático, el cual puede ser comandado por instrucciones del controlador numérico, disminuyendo aun más los tiempos de producción; si la máquina no posee este sistema se debe digitar varios programas, cada uno con una herramienta específica y única para que el producto final sea el mismo.

1.3.4.1 Elementos de las máquinas herramientas de control numérico

Ya que el presente trabajo está dedicado a la automatización de una máquina fresadora, se dará énfasis a las máquinas fresadoras de control numérico computarizado.

1.3.4.1.1 Ejes de movimiento

Los ejes o direcciones de desplazamiento principales son 3 generalmente, pero existen excepciones en las cuales se puede encontrar un número mayor de ejes como por ejemplo 4, 5 o más, debido a las exigencias de ciertas piezas; a los cuales se los conoce como ejes complementarios.

Como se aprecia en la Figura 1.3, la mesa porta-piezas se desplaza por el Eje X longitudinalmente, por el Eje Y transversalmente; el carro porta-cabezal se desplaza verticalmente, en el eje Z. Los ejes X, Y, Z son los más comunes encontrados en este tipo de máquinas [5].

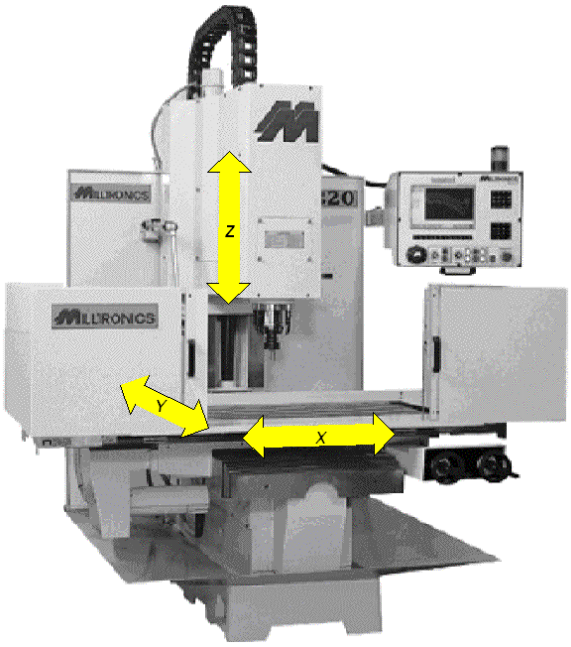


Figura 1.3 Ejes de movimiento de una máquina fresadora CNC, tomado de [6]

1.3.4.1.2 Sistemas de transmisión

La maniobra de desplazamiento combinado de cada eje de movimiento sobre la pieza, producen el recorrido de herramienta de corte.

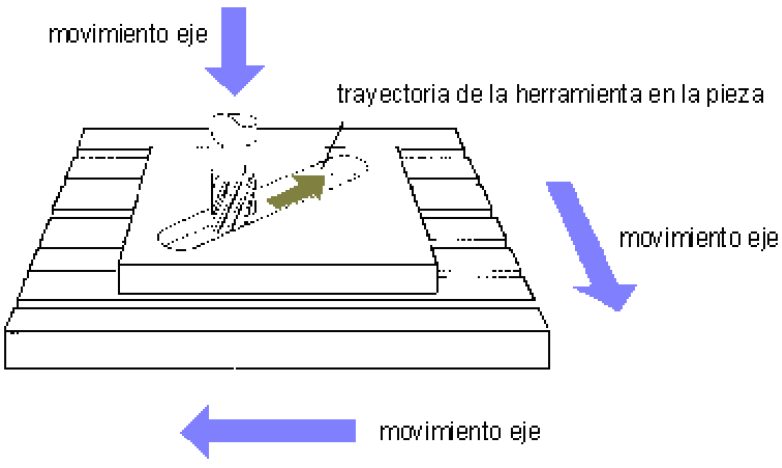


Figura 1.4 Origen de una trayectoria de herramienta, tomado de [5]

Las traslaciones rectilíneas de los ejes de movimiento son generadas por los sistemas de transmisión, que empiezan desde el motor.

Las máquinas herramientas de control numérico poseen un elemento primordial para el movimiento de los ejes, el cual es la transmisión por recirculación de bolas; este se basa en un tornillo sinfín acanalado y un acoplamiento al que se sujeta el conjunto mecánico a desplazar. Entonces si el motor gira, este movimiento angular se trasmite hacia el tornillo sinfín, que a través de la transmisión de bolas produce el movimiento longitudinal de la mesa de corte, según lo requiera el programa de control [5].

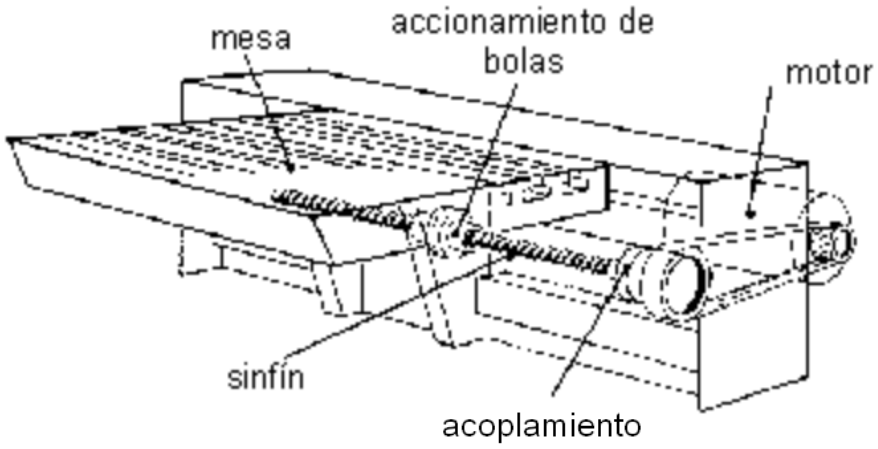


Figura 1.5 Sistema de transmisión de la mesa de trabajo, tomado de [5]

La ventaja de este sistema de transmisión por recirculación de bolas es que garantiza la transferencia de esfuerzos desde el tornillo sinfín hacia la mesa de corte con pérdidas por fricción muy bajas. Además se realiza un ajuste entre las partes que la conforman para reducir el juego mecánico, mejorando la exactitud de los desplazamientos.

Las máquinas de control numérico en un principio tenían un sistema de embrague entre el grupo motor y el tornillo sinfín, el cual desacoplaba la transmisión en el momento que la mesa o algún elemento sobre ella chocaba, para reducir daños en los elementos mecánicos; hoy en día el controlador del motor de cada eje mide

la corriente que circula sobre el mismo y si se genera un pico de corriente demasiado alto producto de una colisión por ejemplo, el controlador se encarga de desactivar al motor.

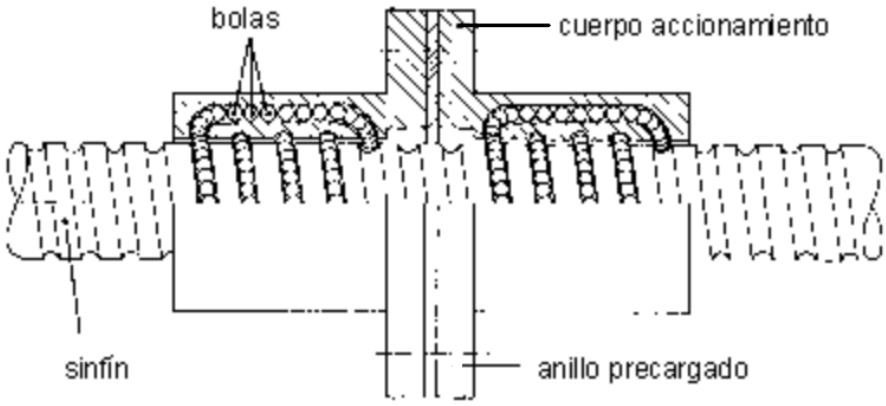


Figura 1.6 Acoplamiento por accionamiento de bolas recirculantes, tomado de [5]

Hace algún tiempo se utilizaban de manera común motores eléctricos de corriente continua en conjunto con elementos electrónicos para tener control sobre la posición, velocidad, corriente, etc. A los cuales se los conocía como servo motores DC, pero por problemas en cuanto a desgaste de elementos (escobillas) y características de torque/tamaño, en la actualidad se utilizan servo motores AC, que no poseen desgaste de escobillas por que no las tienen, además que la relación torque/tamaño es más eficiente.

Los motores paso a paso se emplean como actuadores primarios en máquinas herramientas que poseen pares o torques en la aceleración y desaceleración muy bajos; es por este motivo que se los encuentra comúnmente en máquinas caseras.

1.3.4.1.3 Medición del desplazamiento

Se pueden encontrar dos sistemas para medir la posición de los componentes móviles de las máquinas herramientas de control numérico [5]:

El sistema directo se basa en una escala de medida colocada en la guía de la mesa de la fresadora, sirve para evitar imprecisiones en las medidas de desplazamiento que se pueden producir por el juego entre el tornillo, tuerca y acoplamiento. Se utiliza un encoder óptico con una rejilla lineal para determinar la posición, transformando esta información, en señales eléctricas que serán procesadas por el controlador.

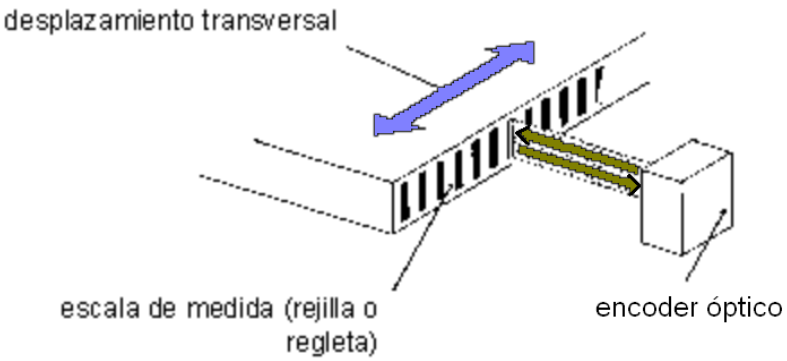


Figura 1.7 Sistema directo para la medición de posición, tomado de [5]

El sistema indirecto, se basa en el cálculo de la posición en función al giro del tornillo sinfín, de la misma manera que el sistema directo un encoder óptico se encarga de inspeccionar el movimiento de un disco graduado y adjunto al tornillo sinfín, generando señales eléctricas las cuales serán procesadas por el controlador.

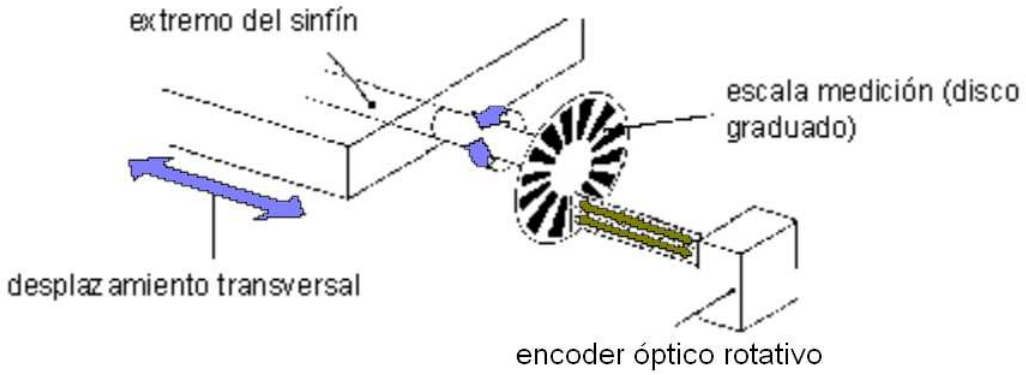


Figura 1.8 Sistema indirecto para la medición de posición, tomado de [5]

1.3.4.1.4 Husillo principal

Es el elemento mecánico encargado de ejecutar la rotación de la herramienta de corte, el cual puede ser accionado por motores eléctricos de corriente continua o corriente alterna trifásicos. Para tener un rango de velocidades se acopla al eje del motor una caja de engranajes reductora de velocidad, o como actualmente se realiza, controlar el motor del husillo principal con un variador de frecuencia, de esta manera se puede establecer la velocidad de giro dependiendo de los requerimientos del programador [5].

1.3.4.1.5 Sistemas de sujeción

Los mecanismos de sujeción aseguran la pieza a mecanizar, en la mesa de corte de la máquina fresadora de control numérico. Este tipo de máquina utiliza varias formas de sujeción, como: sargentos y apoyos con formas escalonadas, graduables en altura o bloques con varias facetas de contacto, con pernos de apriete de montaje/desmontaje rápido, palancas de apriete, mordazas mecánicas, placas angulares de apoyo, mesas magnéticas, dispositivos modulares de uso universal, apoyos de diseño específico, etc.

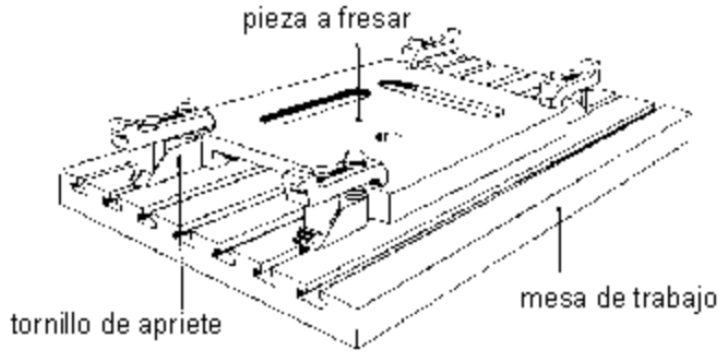


Figura 1.9 Sistema de sujeción con tornillos de apriete, tomado de [5]

Se puede encontrar casos que este sistema de sujeción tiene un cierto grado de control dependiendo si la alimentación de piezas es manual o automática y de su

complejidad, pero se debe tener en cuenta que es crítica la rapidez de montaje/desmontaje y la precisión de posicionado de la pieza a mecanizar.

Los dispositivos que se utilizan frecuentemente son los sistemas de sujeción específicos mediante componentes normalizados y modulares; los cuales permiten las operaciones de corte sin desmontar la pieza [5].

También se pueden encontrar máquinas fresadoras con mesas duales que permiten realizar la sujeción de las piezas así como su transporte fuera de la mesa de corte. Incluso se pueden controlar las acciones de inicio o parada de los mecanizados con funciones del controlador numérico.

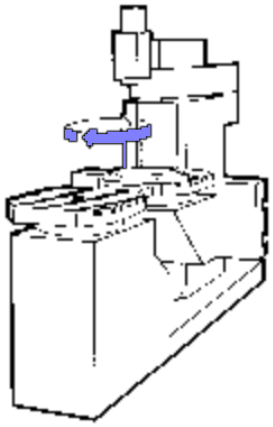


Figura 1.10 Mesa transportable, tomado de [5]

1.3.4.1.6 Sistemas de cambio de herramientas

Una característica representativa de las máquinas herramientas de control numérico es su capacidad de mecanizar un elemento mecánico sin la necesidad de cambiar su posición, dentro del sistema de sujeción; es por este motivo que muchas de ellas ya traen incorporado el sistema automático de cambio de herramientas, a los cuales se los conoce como carrusel de herramientas.

Este sistema es controlado por algunas instrucciones o líneas de código del controlador numérico. Se emplea una garra adicional o manipulador para efectuar el cambio, durante esta operación también se extrae la herramienta colocada en el husillo principal con otro dispositivo manipulador, luego se efectúa un giro para colocar la nueva herramienta en el husillo principal y la anterior de vuelta al carrusel; ésta operación demora al proceso unos pocos segundos [5].

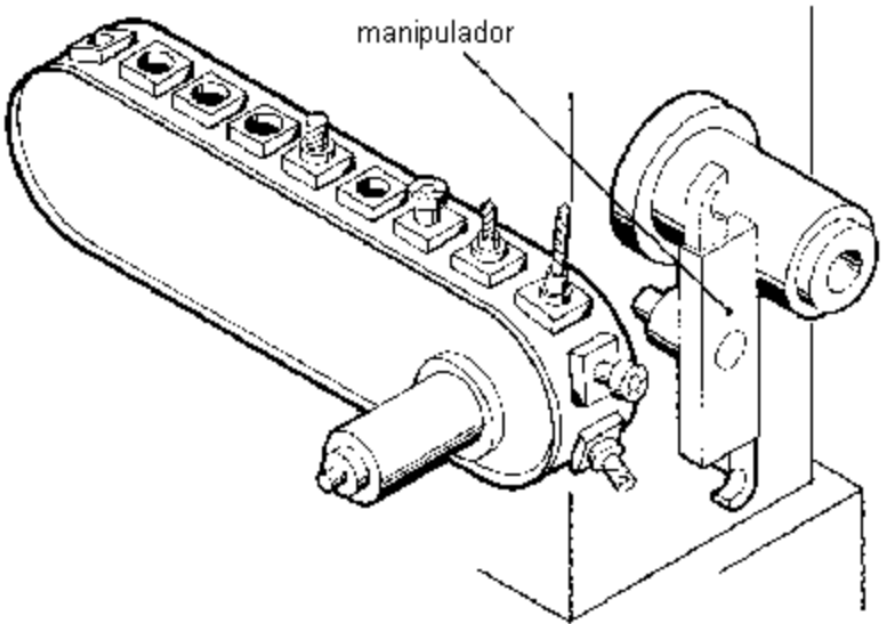


Figura 1.11 Carrusel de herramientas, tomado de [5]

1.3.4.1.7 Ejes complementarios

Entre las máquinas fresadoras de control numérico se pueden encontrar aquellas que poseen mesas giratorias y/o también cabezales de orientación ajustable, constituyendo estos, nuevos ejes de movimiento, ya que las partes a mecanizar requieren de diferentes planos y ángulos de aproximación que no sean los típicos conformados por el sistema de coordenadas X, Y, Z; a estos ejes de movimiento se los conoce como complementarios, y también son gobernados por el controlador numérico de manera automática.

Dentro de la programación del controlador numérico estos ejes se los denomina con las letras A, B, C o también con las letras U, V, W [5].

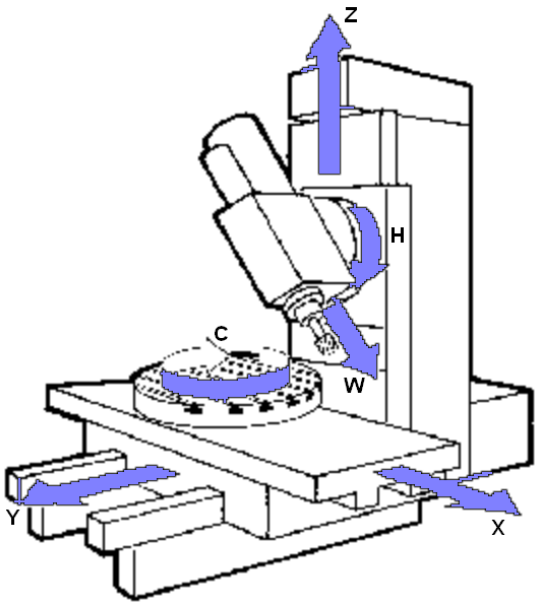


Figura 1.12 Fresadora de 6 ejes, tomado de [5]

1.3.4.1.8 Herramientas [7]

Se conoce como fresa a la herramienta de corte de las máquinas fresadoras ya sean convencionales o CNC, se caracteriza por tener dientes cortantes de forma helicoidales o rectilíneos, con perfil en ángulo, ya sea recto o no en función a tablas predeterminadas.

Dependiendo del material a mecanizar algunas fresas incorporan plaquetas de metal duro (widia) o metalcerámica (cermet). La cantidad de dientes de estas herramientas depende de la dureza del material, del diámetro de la herramienta, etc.

Existen varios tipos de fresas; cilíndricas, circulares, circulares de perfil constante, de plato, fresas madre; de las cuales se utilizan para la máquina de este proyecto las fresas de tipo cilíndricas.

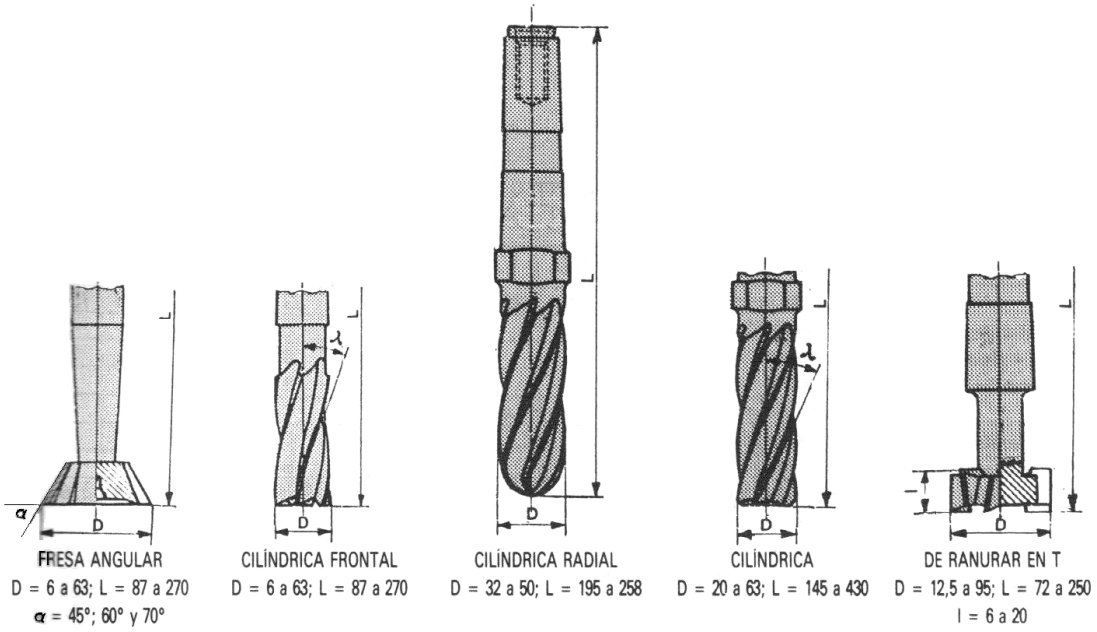


Figura 1.13 Fresas de mango, tomado de [8]

1.3.4.1.9 Acoplamiento [5]

Este dispositivo mecánico se emplea como interfaz entre la herramienta de corte y el husillo principal, cumplen algunos estándares de diseño, a pesar que se puede encontrar una gran diversidad de herramientas de corte. Es necesario que las dimensiones del acoplamiento correspondan con las del extremo del cabezal, para asegurar precisión, extracción simple y sobre todo rigidez. Siendo los más utilizados los acoplamientos cónicos estándar (ISO), ya que garantizan los requerimientos mencionados anteriormente además de centrar la herramienta de corte con respecto al husillo principal.

1.3.4.1.10 Dimensiones elementales

Es muy importante que el controlador numérico conozca las dimensiones exactas de cada herramienta de corte a utilizar por la máquina, para asegurar la precisión dimensional de la pieza a mecanizar. La herramienta de corte de una máquina fresadora se conoce como fresa, la misma que tiene como dimensiones básicas, longitud (L) y radio de corte (R); incluso se puede tener un modelo CAD de la

misma en conjunto con el porta herramienta, desde la etapa de diseño para optimizar el código del programa a ejecutar y evitar posibles colisiones en el trabajo físico.

Para establecer las dimensiones básicas (reglaje) de la herramienta de corte, se puede efectuar una prueba de mecanizado para obtener de manera aproximada las dimensiones, o utilizar un equipo de pre-reglaje, el cual calcula inmediatamente por métodos mecánicos u ópticos las dimensiones con relación al punto de montaje. Este sistema de igual manera se comunica con el controlador numérico para registrar los datos de las dimensiones de las herramientas.

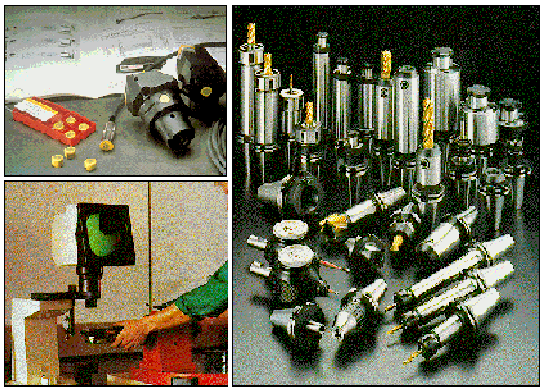


Figura 1.14 Conjuntos de herramientas y portaherramientas, tomado de [5]

En la actualidad lo más común es incluir el modelo CAD de la herramienta de corte con su porta herramienta e incluso el cabezal, dentro de una base de datos, para utilizarlo posteriormente en cualquiera de las operaciones de corte.

Uno de los procedimientos dentro de la operación de la máquina es encontrar el punto cero de herramienta; para lo cual se ejecutan las siguientes acciones: primero se utiliza una herramienta de referencia para hacer contacto con la superficie de la pieza a fabricar, obteniendo de esta manera la altura cero; luego se introduce esta información en el controlador numérico además de la información de las dimensiones de la herramienta, para que este genere automáticamente las trayectorias de corte.

1.3.4.1.11 Componentes del sistema CNC

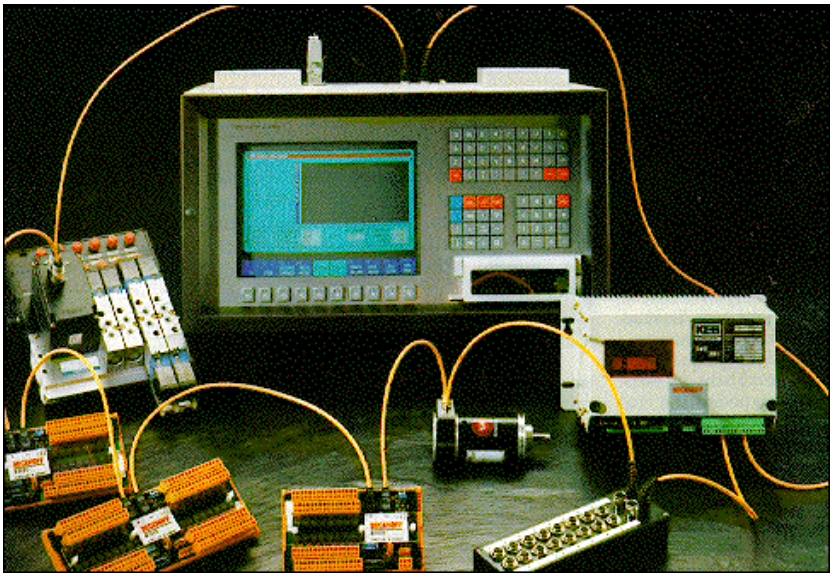


Figura 1.15 Equipos electrónicos de un sistema CNC, tomado de [5]

En la Figura 1.16 se muestra en resumen los elementos que conforman el sistema CNC

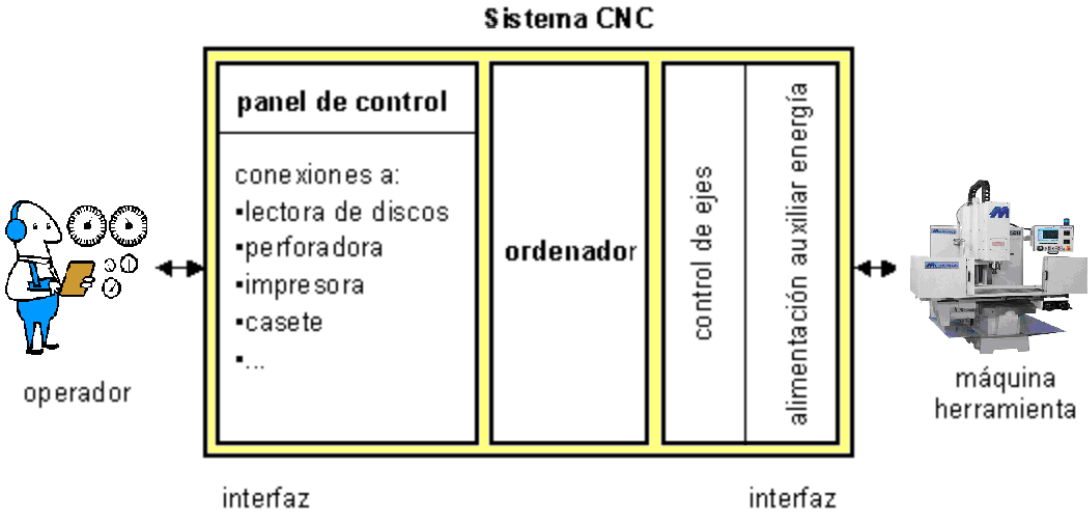


Figura 1.16 Componentes de un sistema CNC, tomado de [5]

El elemento principal del sistema de control numérico computarizado es un computador, el cual procesa toda la información necesaria para ejecutar las acciones de control que gobiernan la máquina. Para ello se requiere de dos interfaces, una entre el operador y el controlador y otra entre el controlador y la máquina.

La interfaz de operador contiene el panel de control y algunos dispositivos como impresora, puertos de comunicación, almacenamiento, etc. En cambio la interfaz de control, está compuesta de varios elementos que comandan los actuadores de los ejes de movimiento, del husillo principal, sistemas de refrigeración, etc., inclusive pueden suministrar la energía eléctrica necesaria, para que estos trabajen correctamente.

1.3.4.1.12 Panel de control

De la misma forma que existen varios modelos de máquinas CNC, se pueden encontrar un sin número de paneles de control, pero la mayoría poseen elementos comunes como: pantalla, perillas, interruptores, indicadores, mandos de control para ejecutar alguna acción manual, controles para la programación como teclados, etc.

Figura 1.17 Panel de control de máquina CNC GSK, tomado de [4]

En algunas máquinas de control numérico se puede encontrar un selector que puede ser una botonera o un dial rotativo, para elegir el modo de operación, teniendo los siguientes: edición – programación, corrección de información sobre las herramientas de corte, operación manual y operación automática.

Dentro de las funciones que realizan los indicadores y la pantalla, se tiene: mostrar el código del programa, configuración de herramientas, tiempo de ejecución, velocidad de avance, velocidad del husillo principal, información numérica de la posición actual, trayectorias, etc.

1.3.4.1.13 Funciones operativas de la máquina

Este tipo de funciones comandan acciones básicas de la máquina como por ejemplo: activar / desactivar refrigeración, encender / apagar husillo principal. Por lo general estas funciones se simbolizan con un icono anexado al botón.

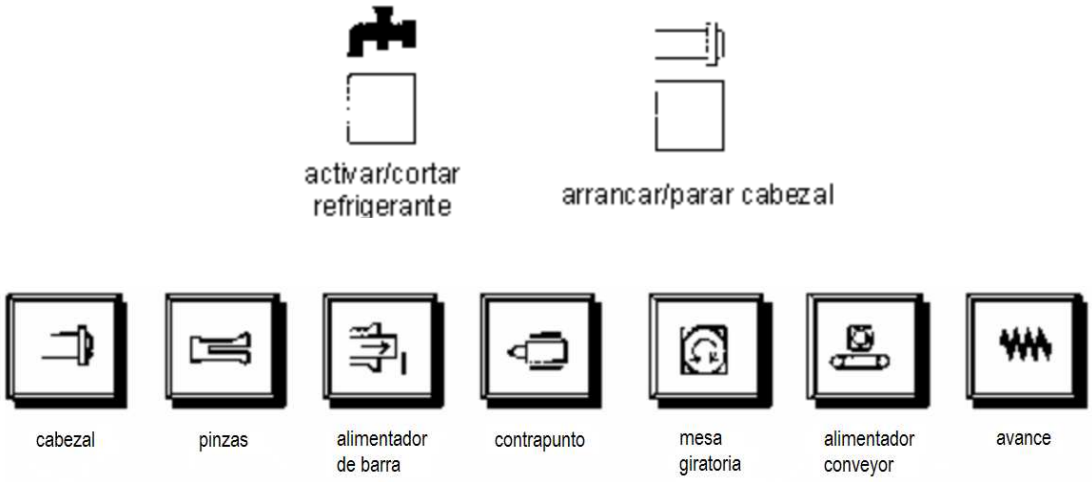


Figura 1.18 Símbolos descriptivos para mandos de funciones máquina, tomado de [5]

También se pueden encontrar diales, botoneras, joystick, para controlar de manera manual los ejes principales de movimiento.

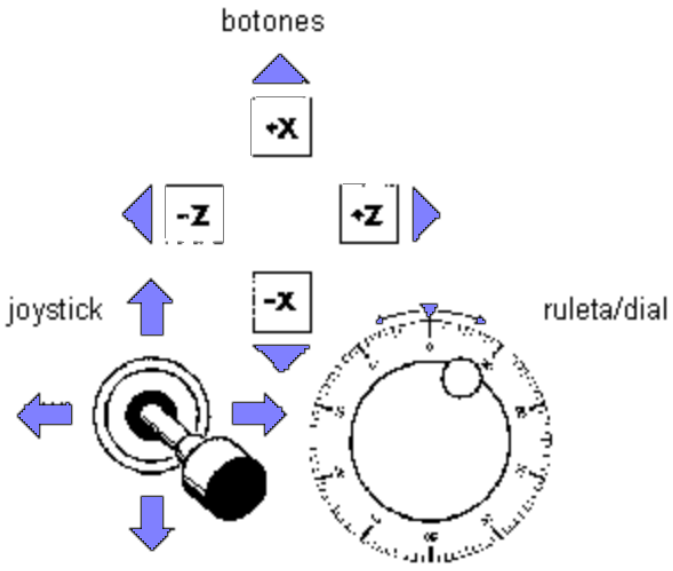


Figura 1.19 Joystick, botones y dial de avance, tomado de [5]

Existen diales para variación porcentual de parámetros como avances y giros, mientras la máquina está en funcionamiento; se los utiliza comúnmente para disminuir la velocidad del proceso durante la fabricación de la primera pieza para verificar si el procedimiento es apropiado.

1.3.4.1.14 Teclado de programación

Este tipo de teclado es claramente identificable, ya que posee un conjunto de caracteres restringido a letras mayúsculas como G, M, F, X, números 0, 1, 2, y signos para operaciones aritméticas básicas +, -, los cuales permitirán digitar el código de programa. También se puede hallar teclados que incluyen funciones muy específicas para ahorrar tiempo de digitación, como por ejemplo: G00 (desplazamiento rápido), G01 (desplazamiento lineal con avance), G02 (desplazamiento circular horario), etc.

Así también existen teclas de comandos del ordenador, para ejecutar tareas como almacenamiento de programa, inicio de programa, etc. Normalmente se las reconoce por integrar símbolos o abreviaciones.

1.3.4.1.15 Dispositivos auxiliares

Antiguamente las máquinas de control numérico utilizaban dispositivos externos para almacenar el código de programa, como por ejemplo cintas perforadas las que constaban de 8 canales por línea para formar un byte; también se almacenaba información en cintas magnéticas como casetes y disquetes; en la actualidad algunas máquinas todavía utilizan el disquete como medio de almacenamiento pero la tecnología ha mejorado a tal punto que el mismo controlador numérico posee mayor cantidad de memoria o también se puede encontrar unidades de almacenamiento externo parecidos a los pendrive, o algún dispositivo que se encargue de gestionar el código de programa.

1.3.4.1.16 Microprocesador

El microprocesador constituye el elemento principal del sistema CNC ya que es el encargado de efectuar las operaciones o cálculos requeridos por los comandos de entrada enviados por el operador desde el panel de control o HMI; este procedimiento genera nueva información, que será transformada en un movimiento de la máquina o en una visualización de estado de la máquina herramienta hacia el operador.

Los computadores de un sistema CNC poseen varios microprocesadores los cuales siempre van acompañados de módulos de memoria ya sea de trabajo o de almacenamiento.

1.3.4.1.17 Interfaz de control

Como es el caso de este proyecto de titulación, las máquinas CNC pueden utilizar un computador personal como elemento central de control, este tipo de implementación es recomendable cuando se necesita gobernar coordinadamente varias máquinas herramientas de control numérico, sistemas robóticos, transporte automático, etc.

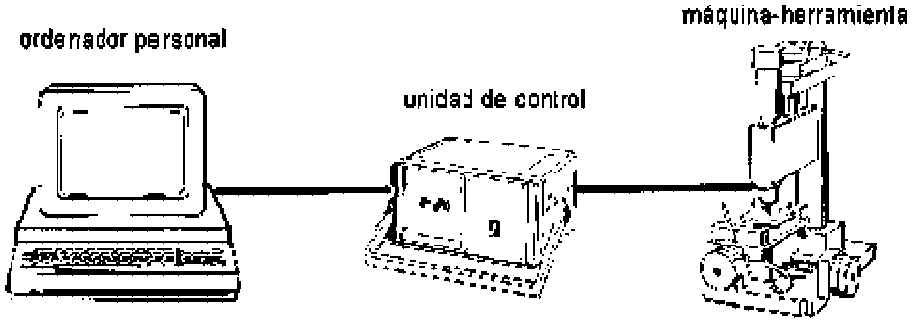


Figura 1.20 Computador personal como sistema CNC, tomado de [5]

Cuando se utiliza el computador personal, se requiere de una interfaz de control que transforma el resultado del procesamiento del computador en señales eléctricas que controlan los elementos actuadores de la máquina herramienta.

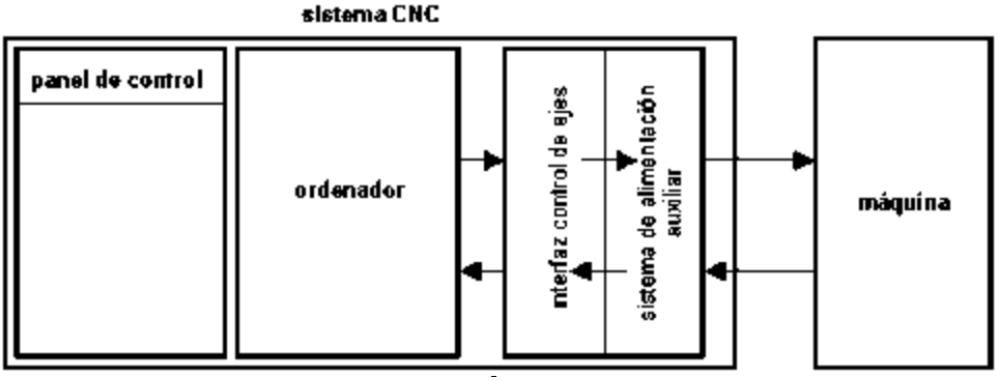


Figura 1.21 Intercambio de señales entre el computador y la máquina, tomado de [5]

La unidad de control es un elemento autónomo, el cual puede tener una programación específica para manejo de los elementos de la máquina, esta programación viene de fábrica y por lo general no puede ser modificada por el usuario final; es muy común encontrar a un PLC como interfaz de control.

1.3.4.2 Principios de mecanizado en control numérico [5]

Los factores que intervienen directamente en el proceso de corte de material

ejecutado por las máquinas herramientas de control numérico más significativos son:

1.3.4.2.1 Refrigerante

Este cumple algunas funciones como: disipar calor en el punto de corte, para evitar daños tanto en la herramienta como en la pieza; la lubricación del refrigerante reduce la fricción y desgaste de la herramienta además favorece la extracción de la viruta. Al utilizar refrigerante se puede trabajar con velocidades de corte elevadas.

Se tiene varios tipos de refrigerante; disoluciones en agua como soluciones salinas, aunque no son efectivas como lubricante; las emulsiones como agua y aceites minerales con aditivos, con una mejor lubricación por las sustancias grasas; por último se tiene los aceites de corte con grasas y aditivos.

Se debe renovar estas sustancias de forma periódica ya que caducan después de un tiempo; algunos refrigerantes son nocivos para la piel, por lo que se requiere tomar medidas de seguridad; de igual manera pueden ser perjudiciales para componentes específicos de la máquina, por lo que se sugiere utilizar aceites minerales.

1.3.4.2.2 Material

Existen dos características importantes que se deben considerar con respecto al material, la resistencia a la compresión y su capacidad de ser maquinado, ya que de estos factores depende el tipo de herramienta a utilizar y el sistema de sujeción a elegir.

La elección de la herramienta adecuada depende del tipo de acabado que se desee dar al producto final; además se deben considerar sus características geométricas y físicas, para programar adecuadamente las trayectorias así como las velocidades de avance y de corte.

1.3.4.2.3 Viruta

Se conoce como viruta al material excedente en el proceso de corte, son favorables o desfavorables, dependiendo del tipo de material de la herramienta, velocidad de corte, material de la pieza, factor de compresión, etc.

1.3.4.3 Ejes de coordenadas en control numérico

Dependiendo del tipo de máquina herramienta CNC, su herramienta de corte está en capacidad de efectuar varios movimientos como longitudinales, transversales y transversales secundarios; es por este motivo que se debe tener control sobre todos los puntos que conforman el espacio de movimiento, otorgando al programador una orientación mientas se encuentra elaborando el código de programa.

1.3.4.3.1 Sistema de coordenadas de dos ejes

Este sistema es el más básico para programación de control numérico, está conformado por dos ejes (normalmente X, Y) intersecados en el origen del sistema; con este se obtiene información exacta de todos los puntos que conforman el dibujo de la pieza.

1.3.4.3.2 Sistema de coordenadas de tres ejes

Este tipo de sistema es necesario para mecanizar piezas en máquinas fresadoras, ya que se requiere no solo de información en cuanto a posicionamiento X, Y, sino que también se necesita información de profundidad Z.

El controlador de la máquina transforma los valores de coordenadas escritos en el código de programa, en movimientos de la mesa y/o del cabezal; esto depende del tipo de operación que se realice, y se le conoce como movimiento relativo de herramienta.

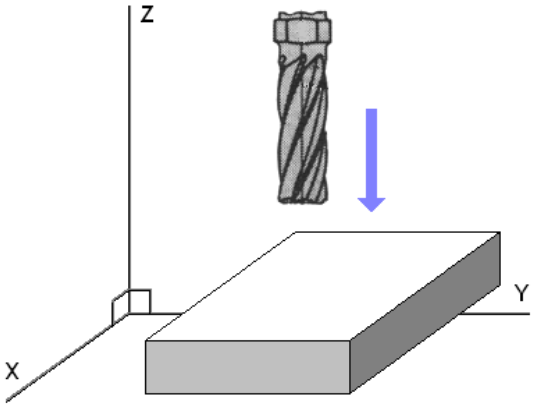


Figura 1.22 Pieza en sistema de coordenadas tridimensional, tomado de [5]

1.3.4.3.3 Desplazamientos

Una máquina fresadora CNC puede efectuar cualquier tipo de mecanizado en base a desplazamientos lineales y circulares.

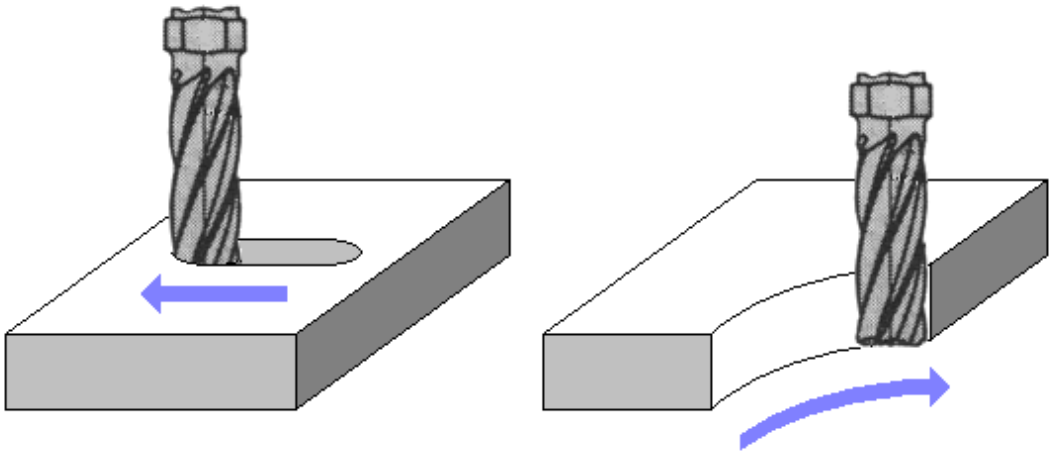


Figura 1.23 Desplazamientos, tomado de [5]

El desplazamiento es lineal cuando la trayectoria de la herramienta forma una línea recta, la que puede ser representada en el espacio mediante el sistema de coordenadas de 3 ejes (X, Y, Z), los cuales tienen la característica de ser perpendiculares entre si y de formar planos perpendiculares.

Si se utiliza un sistema de coordenadas de dos ejes y se desea detallar una circunferencia, basta con proporcionar el punto central de la misma y su radio.

Para el sistema de tres ejes es necesario establecer los parámetros anteriores y el plano que contiene la circunferencia.

1.3.4.4 Programación de control numérico

Para programar operaciones de mecanizado, se requiere de información geométrica y tecnológica como: datos de herramienta, datos dimensionales de contorno final, datos de corte, descripción de movimientos, funciones de máquina y posicionamiento de puntos de referencia [5].

1.3.4.4.1 Programación geométrica simple

Como paso inicial se debe asignar el punto de origen de la pieza a mecanizar; luego enumerar los puntos geométricos importantes para tabularlos a manera de coordenadas y por último seleccionar la secuencia adecuada para el movimiento de la herramienta de corte.

1.3.4.4.2 Programación con distribución de pasadas

Este procedimiento consiste en desbastar la pieza con una cierta cantidad de pasadas, dependiendo del tipo de acabado que se requiera, ya que la herramienta debe recorrer varios niveles de profundidad de corte; el paso final de este procedimiento, sería el proceso de acabado de contorno.

1.3.4.4.3 Programación de datos tecnológicos

La programación de los datos de información tecnológica comprenden; velocidades de corte, rotación, avance; tipos de herramienta, estas pueden ser enumeradas dentro del programa como T1, T2, T3, T4, etc. ó 1, 2, 3, 4, etc. para

llamar a una determinada herramienta; durante este procedimiento automático la máquina puede detenerse durante un tiempo corto.

1.3.4.4.4 Edición de programas de control numérico

Como se mencionó anteriormente el controlador numérico es el encargado de gobernar la máquina herramienta; para esto el operador de la máquina CNC, ingresa la información de la pieza a mecanizar en el computador de la máquina, para formar el programa de control numérico; gran parte del código es estándar para todas las máquina CNC, pero ciertos fabricantes utilizan variantes en las funciones para aprovechar de mejor manera su modelo de máquina.

Terminado la etapa de edición, el código de programa es transformado por el controlador en señales eléctricas que gobernarán la máquina herramienta.

1.3.4.4.5 Desarrollo de programas de control numérico

1.3.4.4.5.1 Programa de control numérico

El procedimiento tradicional para mecanizar una pieza utilizando una máquina herramienta convencional, necesita de planificación del trabajo, además de planos de la pieza, para que el operador tenga una guía al momento de realizar el trabajo; con esto se preparan los materiales y herramientas necesarios para efectuar las acciones de mecanizado.

Si se utiliza máquinas CNC, el procedimiento es distinto; ya que se escribe un código de programa, en el cual las acciones de mecanizado deben ordenarse correctamente; el operador de la máquina se encarga de acondicionarla, inspeccionar el procedimiento de mecanizado, cargar/fijar/liberar piezas, dar mantenimiento. La flexibilidad de este procedimiento consiste en modificar una o varias líneas de programa, ya sea por el mismo operador, para cambiar el producto final.

Dentro del programa de control numérico, se encuentra información tecnológica como, velocidad de avance (F50 equivale a una velocidad de avance de 50 unidades por minuto), velocidad de giro del husillo principal (S1800 equivale a una velocidad de giro de 1800 revoluciones por minuto); información geométrica como coordenadas X, Y, Z; etc. También se puede encontrar subrutinas si así lo requiere el programa principal, para evitar escrituras extensas y repetir código.

Es común encontrar instrucciones de programa de control numérico (G00 desplazamiento rápido) junto a condiciones adicionales (X60 Y90 Z0, coordenada de destino), constituyendo un bloque de programa.

Tabla 1.1 Bloques de programa CNC, tomado de [5]

G00	X60	Y90	Z0	
G01	X53	Y76	Z0	F0.2
G01	X14	Y76	Z0	
G02	X34	Y50	Z0	R20

A estos se los determina por números de bloque (N10, N20, N30, son números que se asignan a las líneas de código).

Tabla 1.2 Bloques de programa CNC, tomado de [5]

N60	G01	X10	Z76
N70	G27		
N80	T5		

1.3.4.4.6 Lenguaje de programación de control numérico

La norma que se utiliza para este tipo de lenguaje es DIN 66025 “Desarrollo de programas de control numérico” (partes 1 y 2); estas son muy similares a las normas internacionales ISO/DIS 6983 y ISO/DP 6983 “Control numérico de máquinas” [5].

Tabla 1.3 Equivalencia de letras de dirección, tomado de [5]

A	Rotación sobre el eje X
B	Rotación sobre el eje Y
C	Rotación sobre el eje Z
D	Memoria de offset de corrección de herramienta
E	Segunda velocidad de avance
F	Velocidad de avance
G	Función de desplazamiento
H	Sin asignar
I	Parámetro de interpolación paralelo al eje X
J	Parámetro de interpolación paralelo al eje Y
K	Parámetro de interpolación paralelo al eje Z
L	Sin asignar
M	Función suplementaria
N	Número de bloque
O	Sin asignar
P	Tercer movimiento paralelo al eje X
Q	Tercer movimiento paralelo al eje Y
R	Desplazamiento rápido en dirección del eje Z o tercer movimiento paralelo al eje Z
S	Velocidad de giro
T	Herramienta
U	Segundo movimiento paralelo al eje X
V	Segundo movimiento paralelo al eje Y
W	Segundo movimiento paralelo al eje Z
X	Movimiento en dirección del eje X
Y	Movimiento en dirección del eje Y
Z	Movimiento en dirección del eje Z

Dentro de las letras de instrucción, se tiene que las instrucciones G (G00 a G99) son las más significativas, ya que gobiernan el desplazamiento de la herramienta.

Como se mencionó anteriormente algunos fabricantes utilizan modificaciones a la norma para sacar el mayor provecho de su modelo de máquina, es por ese motivo

que proporcionan algunas condiciones de programación que pueden o no ser estándar.

Durante la compilación del programa se pueden detectar errores automáticamente, siendo estos de sintaxis, si son de contenido por ejemplo coordenadas, estos se los puede detectar solo mediante la ejecución del programa.

1.3.4.4.7 Instrucciones de control numérico

Dentro de las más utilizadas se tiene:

Tabla 1.4 Equivalencias de códigos G, tomado de [5]

G00:	Desplazamiento rápido
G01:	Desplazamiento lineal con avance
G02:	Desplazamiento circular, sentido horario
G03:	Desplazamiento circular, sentido antihorario

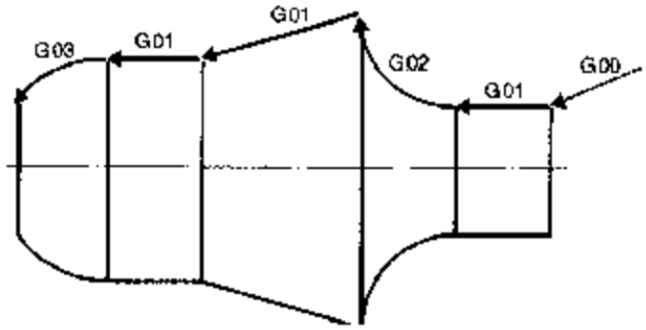


Figura 1.24 Trayectorias en función a códigos G, tomado de [5]

Las funciones suplementarias para estas instrucciones son las coordenadas, que pueden ser absolutas, incrementales o relativas, sentencias de ángulo suplementario, coordenadas polares; el tipo de coordenadas que se utilicen depende del controlador numérico.

El programa de control trabaja de tal manera que no se requiere escribir nuevamente ciertas funciones o instrucciones, con el objetivo de simplificar la escritura; pero esto no quiere decir que dejan de funcionar sino que trabajan hasta que sean modificadas en las líneas de código posteriores, a esto se conoce como actuación modal.

Tabla 1.5 Bloques de programa CNC, tomado de [5]

G01 G01	X10 Z10	Y22 Z40	F300	S1200

1.3.4.4.7.1 G00 desplazamiento rápido

Esta instrucción desplaza la herramienta a la coordenada especificada con la máxima velocidad de la máquina; la trayectoria que sigue es una línea recta.

1.3.4.4.7.2 G01 desplazamiento lineal con avance

Con esta instrucción se realiza el movimiento lineal a una velocidad de avance especificada por el programador, incluso se agrega a la instrucción la función suplementaria velocidad de giro.

La rapidez con que la pieza es fabricada, depende de la velocidad de avance, la misma que debe ser seleccionada en función de la materia prima, del acabado, de las características de la herramienta, etc.

Si se tiene el siguiente bloque de programa; “G01 X10 Y50 Z35 F55 S1200”, quiere decir que la herramienta se va a desplazar linealmente a la coordenada (X10 Y50 Z35), con una velocidad de avance de 55 mm/min y una velocidad de corte de 1200 rpm.

1.3.4.4.7.3 G02, G03 desplazamiento circular horario y antihorario

Figura 1.25 Arco para fresado, tomado de [5]

La Instrucción G02 efectúa un movimiento circular en sentido horario, en cambio la instrucción G03 realiza un movimiento circular en sentido antihorario; estas instrucciones requieren de funciones suplementarias como; coordenadas del punto destino, centro de giro, velocidad de avance, velocidad de corte.

Se utiliza dimensiones incrementales al punto de partida para el centro del arco, con letras de dirección I, J, K.

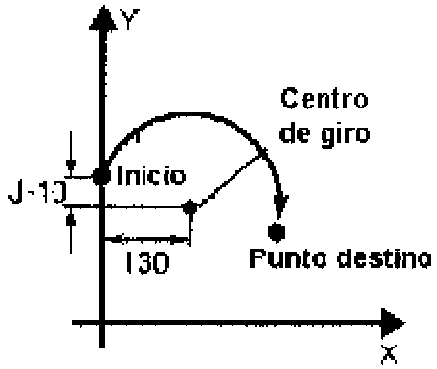


Figura 1.26 Ejemplo de G02, tomado de [5]

De acuerdo a la Figura 1.26, se tiene que el punto de partida es la coordenada (X0 Y50), si se ingresa el siguiente bloque “G02 X60 Y30 I30 J-10 F10 S600”; se tiene que el punto de destino es (X60 Y30), el centro del arco en dimensiones

incrementales es (I30 J-10), la velocidad de avance es de 10 mm/min y la velocidad de corte es de 600 rpm.

1.3.4.4.7.4 G90, G91 sistema de coordenadas absoluto e incremental

Si se utiliza la instrucción G90, quiere decir que se tiene un sistema de coordenadas absolutas con referencia al origen de la máquina; si se emplea la instrucción G91, se tiene un sistema de referencia incremental con origen a la última posición actual.

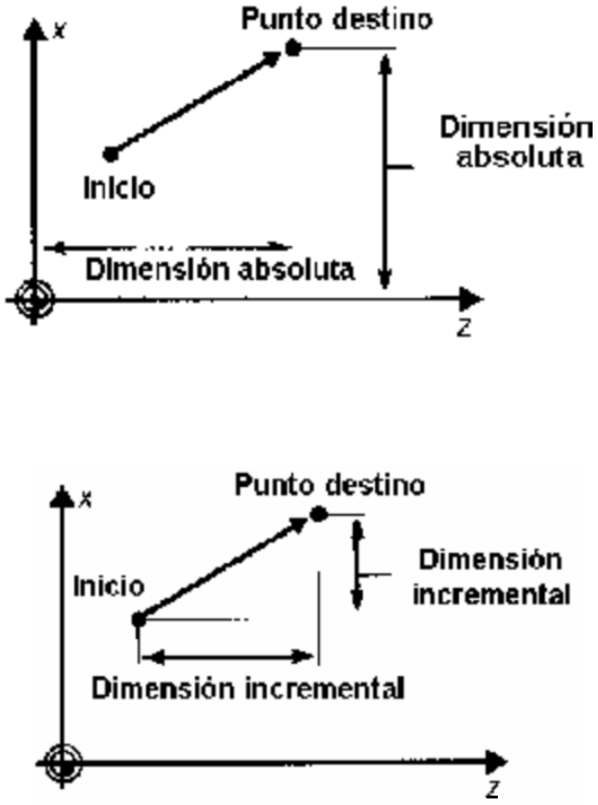


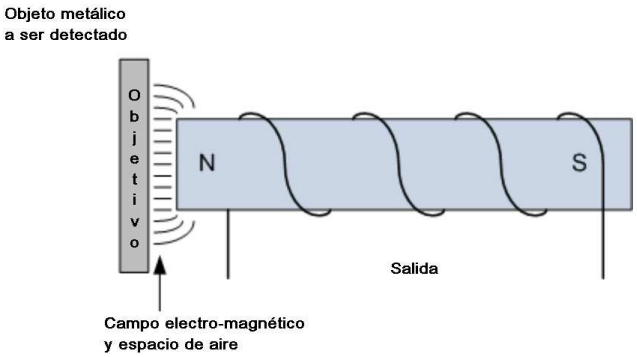
Figura 1.27 Coordenadas absolutas (G90) e incrementales (G91), tomado de [5]

Algunos controladores numéricos utilizan las letras U, V, W, para coordenadas incrementales y X, Y, Z para las absolutas.

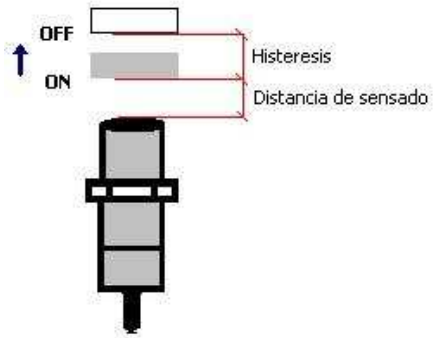
1.4 SENSORES Y ACTUADORES

Para automatizar la máquina fresadora de este proyecto fue necesario implementar un sensor de proximidad inductivo para medir la velocidad del motor del husillo principal, encoders rotativos incrementales para medir la posición de los ejes de movimiento; asimismo se utilizaron actuadores eléctricos para ejecutar los movimientos de la máquina como motores paso a paso, servo motor AC y un motor de inducción.

1.4.1 SENSOR DE PROXIMIDAD INDUCTIVO



(a)



(b)

Figura 1.28 (a) Principio de funcionamiento de un detector inductivo, tomado de [9]; (b) Distancia de sensado e histéresis, tomado de [10]

Este tipo de sensor también es conocido como sensor de corriente de Eddy; es utilizado para detectar la presencia de un objeto que está en frente a ellos. Es un dispositivo que trabaja sin contacto ya que utiliza un campo electromagnético para la detección. En este tipo de dispositivos una bobina es envuelta en un núcleo de hierro produce un campo electromagnético para formar un lazo inductivo.

Cuando un material ferromagnético es colocado cerca del sensor como un plato metálico o un tornillo metálico, la inductancia de la bobina cambia significativamente, esta variación es detectada por el circuito interno del sensor produciendo un voltaje de salida [9].

1.4.2 ENCODER ROTATIVO INCREMENTAL

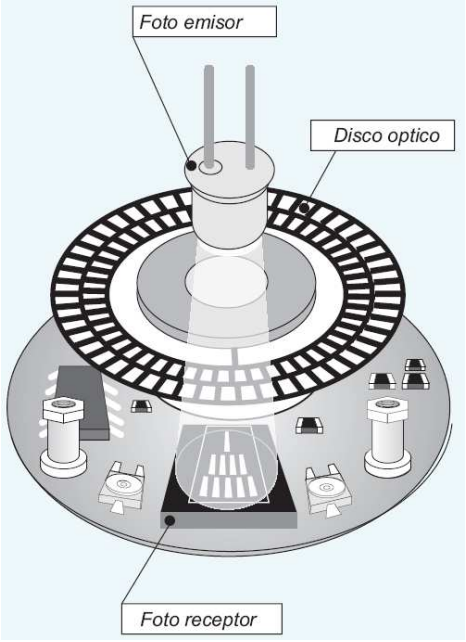


Figura 1.29 Elementos constitutivos de un encoder rotativo incremental, tomado de [11]

Este dispositivo es un transductor rotativo que convierte el movimiento angular en señales eléctricas con forma de onda cuadrada; los mismos que pueden ser empleados para manejar movimientos angulares o lineales.

Se utiliza el principio de rastreo fotoeléctrico para detectar el movimiento angular; su sistema de lectura consta de un disco graduado con un reticulado radial, el cual es iluminado por una fuente de luz, el disco proyecta su imagen sobre la superficie de varios receptores que utilizan una malla conocida como colimador el cual posee el mismo paso que el disco reticulado [11].

Para obtener señales de forma cuadrada y sin interferencia, se deben procesar las señales detectadas con un circuito electrónico; típicamente se utilizan señales diferenciales para eliminar interferencias de modo común.

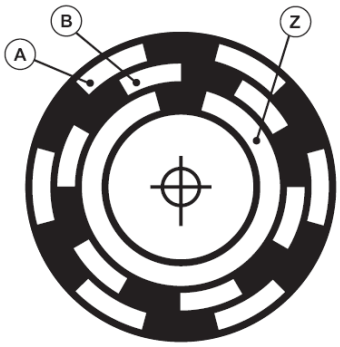


Figura 1.30 Representación de las señales incrementales A, B y Z en disco óptico, tomado de [11]

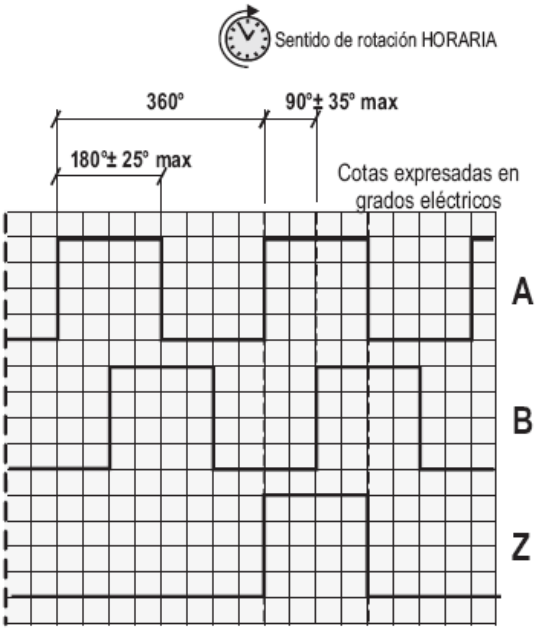
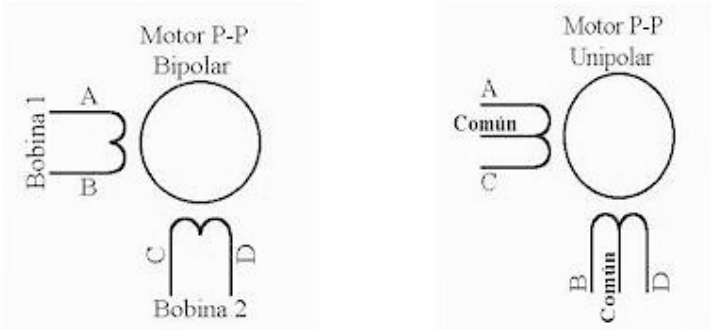


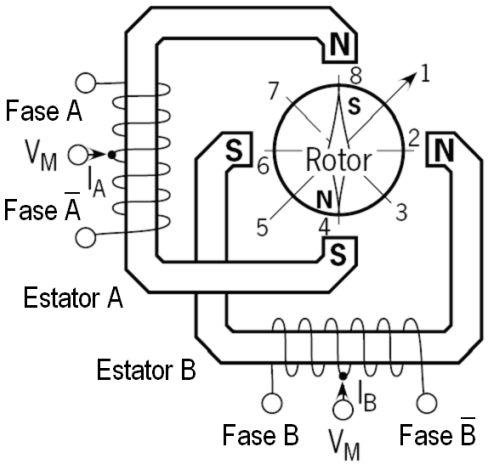
Figura 1.31 Formas de onda de los canales A, B, Z del encoder, tomado de [11]

Este tipo de encoder suministra normalmente 3 señales conocidas como A, B, Z, las cuales tienen forma de onda cuadrada; las señales A y B están desfasadas 90º eléctricos. Para conocer la velocidad de rotación del dispositivo, basta con tomar una de las señales que proporciona; al emplear dos de ellas (A y B) se puede distinguir el sentido de rotación. La señal Z sirve para conocer la posición absoluta del eje.

1.4.3 MOTOR PASO A PASO



(a)



(b)

Figura 1.32 (a) Tipos de motores paso a paso de imán permanente, tomado de [12]; (b) Elementos constitutivos de un motor paso a paso de imán permanente, tomado de [13]

Este tipo de motor se utiliza cuando se necesita mover un mecanismo de una manera muy precisa. Se caracteriza por girar un cierto ángulo en función de la excitación específica de sus bobinas; dependiendo del fabricante se pueden encontrar motores de pasos que giran desde 1.8º / paso hasta 90º / paso. Otra característica importante de este motor es la posibilidad de quedar estático en una posición determinada, o al contrario quedar totalmente suelto.

Los motores de pasos de imán permanente se dividen en dos tipos; unipolares y bipolares; en este proyecto de titulación se utilizó un motor de pasos de imán permanente unipolar.

Los motores de pasos unipolares poseen normalmente 5 ó 6 cables, dependiendo de la conexión interna de las bobinas; a diferencia de los motores bipolares, estos son de fácil control ya que no requiere de una configuración de conmutación externa complicada como es el caso de los motores bipolares que necesitan de un puente con 4 elementos de conmutación por cada bobina.

1.4.4 SERVO MOTOR AC

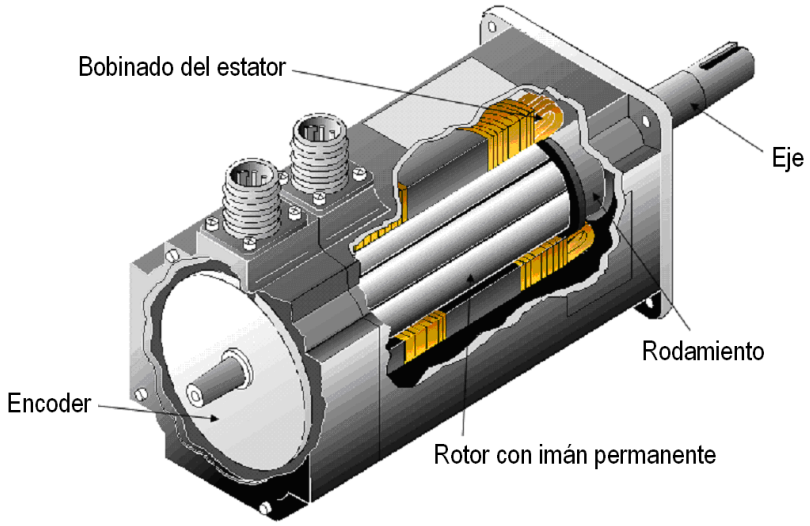
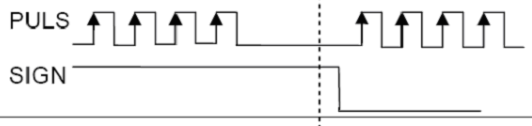
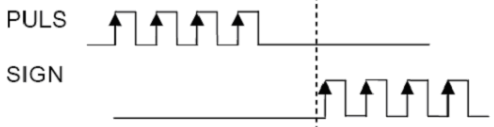


Figura 1.33 Elementos constitutivos de un servo motor AC Mitsubishi, tomado de [14]

Este tipo de motor, en conjunto con su controlador posee características de control parecidas a los motores de pasos, pero presenta una gran ventaja frente a ellos, ya que tienen integrado un encoder rotativo, con el cual se puede conocer su posición. Están conformados por un rotor con imán permanente, un bobinado en el estator, un eje, rodamiento, encoder y varios elementos mecánicos.

El servo drive recibe señales de dirección / pulsos; o pulsos horario / pulsos antihorario, para mover un cierto ángulo requerido. Otra ventaja frente a los motores de pasos es que estos trabajan a torque nominal desde 0 rpm hasta velocidad nominal que para este caso es 3000 rpm; además que presentan una precisión de 0.036º

Tabla 1.6 Formas de comando por pulsos, tomado de [15]

Formas de Comando por pulsos	Antihorario	Horario	Valores para configuración de parámetro
Símbolo / Tren de pulsos			0 Comando por pulsos + Símbolo
Tren de pulsos antihorario Tren de pulsos horario			1 Pulsos Antihorario / Pulsos Horario

1.4.5 MOTOR DE INDUCCIÓN

Este tipo de motor eléctrico también se lo conoce como motor asíncrono y trabaja con corriente alterna; sus partes constitutivas son, un rotor jaula de ardilla (típicamente) o también puede ser un rotor bobinado, el estator donde están las bobinas inductoras; este bobinado es trifásico y se encuentran desfasados 120º eléctricos; de acuerdo al teorema de Ferraris si por el bobinado recorre un sistema de corrientes trifásicas, se induce un campo electromagnético giratorio que rodea al rotor, el mismo que induce un voltaje en el rotor por la ley de inducción de Faraday. Por este motivo se genera el efecto Laplace, el cual menciona que las condiciones anteriores producen una fuerza que pone en movimiento al rotor.

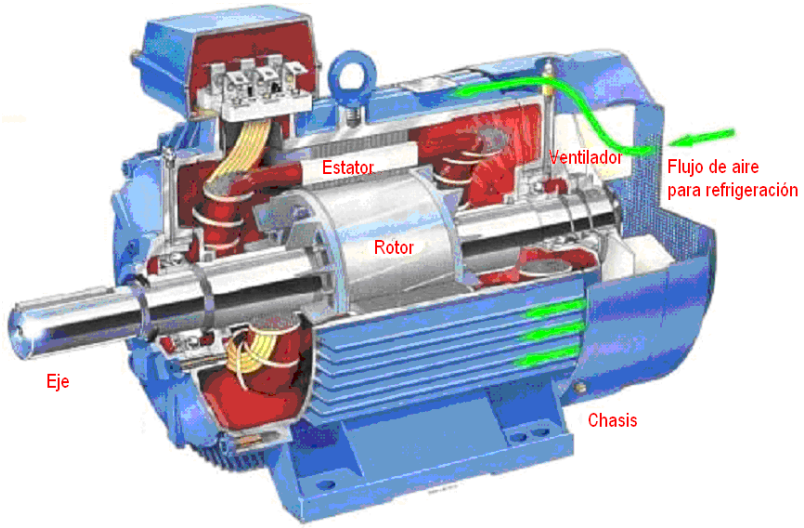


Figura 1.34 Partes constitutivas de un motor de inducción, tomado de [16]

CAPÍTULO 2

DISEÑO DEL SISTEMA

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

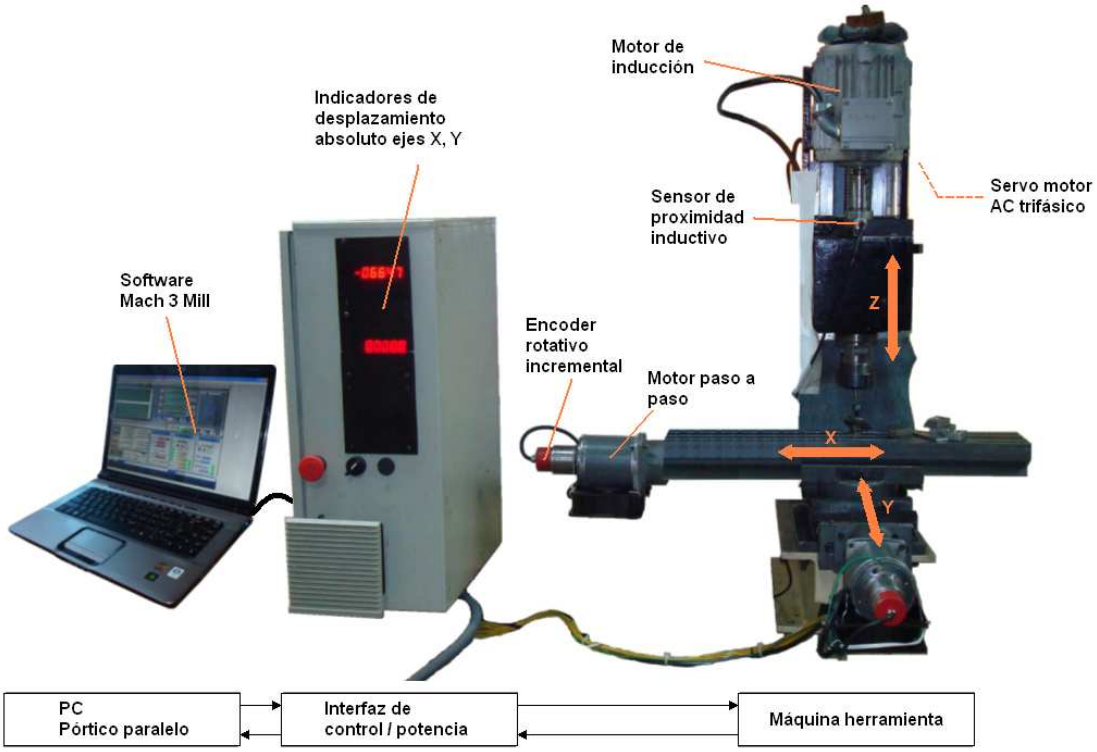


Figura 2.1 Máquina fresadora CNC

El prototipo a implementar presenta las siguientes características: control independiente en lazo cerrado del desplazamiento de los ejes X, Y, utilizando dos motores paso a paso de 2º / paso y encoders rotativos incrementales de 400 pulsos / revolución, para el eje Z se emplea un servo motor AC trifásico con una resolución de 0.036º; control de velocidad en lazo cerrado del motor del husillo principal mediante un variador de frecuencia y un sensor de proximidad inductivo; se tiene un desplazamiento máximo en X, Y, Z de 200, 60, 200 mm; se alcanza una velocidad máxima de desplazamiento en X, Y, Z de 90, 90, 300 mm/minuto; la

potencia del motor acoplado al husillo principal es de 1 hp; el rango de velocidad del husillo principal varía de 0 a 2500 rpm; el controlador numérico está compuesto por un computador con el software Mach 3 Mill.

Para automatizar el prototipo, se requiere diseñar el sistema eléctrico que está compuesto por: dos módulos de control, cada uno con tres tarjetas electrónicas, que se encargan de controlar la posición y consumo de corriente de los motores paso a paso, además de proporcionar información visual de la posición absoluta del desplazamiento de los ejes X, Y, así como información de errores del controlador, para esto se necesita diseñar, un acondicionamiento de la señal de referencia de límite de corriente, un acondicionamiento para la visualización del error de sobre corriente, el circuito del microcontrolador encargado del control de límite de corriente y visualización, el circuito de barrido de displays, un acondicionamiento para sensar la corriente de consumo del motor paso a paso, un acondicionamiento para las señales A y B del encoder rotativo incremental, un acondicionamiento para la visualización del error de posición, el circuito del microcontrolador encargado del control de posición, un acondicionamiento de las señales pulsos, dirección y habilitación, por último una fuente de alimentación.

Además incluye dos módulos de potencia para manejar los motores paso a paso, los cuales integran opto acopladores para aislar eléctricamente la etapa de control con la de potencia; un circuito interfaz entre el computador y los módulos de control, para acondicionar las señales provenientes del pórtico paralelo del computador hacia el circuito de control de posición y servo controlador; un circuito interfaz entre el computador y elementos externos, para acondicionar las señales provenientes del pórtico paralelo del computador que manejan elementos como relés y salida tipo PWM para control de variador de frecuencia, un acondicionamiento de las señales de elementos externos como finales de carrera o sensor de proximidad inductivo hacia las entradas del pórtico paralelo, un acondicionamiento de la señal proveniente del controlador del motor de pasos para manejar un relé a través de un circuito de retardo a la conexión y una fuente de alimentación.

También se necesita diseñar una fuente para los motores paso a paso.

2.2 SISTEMA ELÉCTRICO

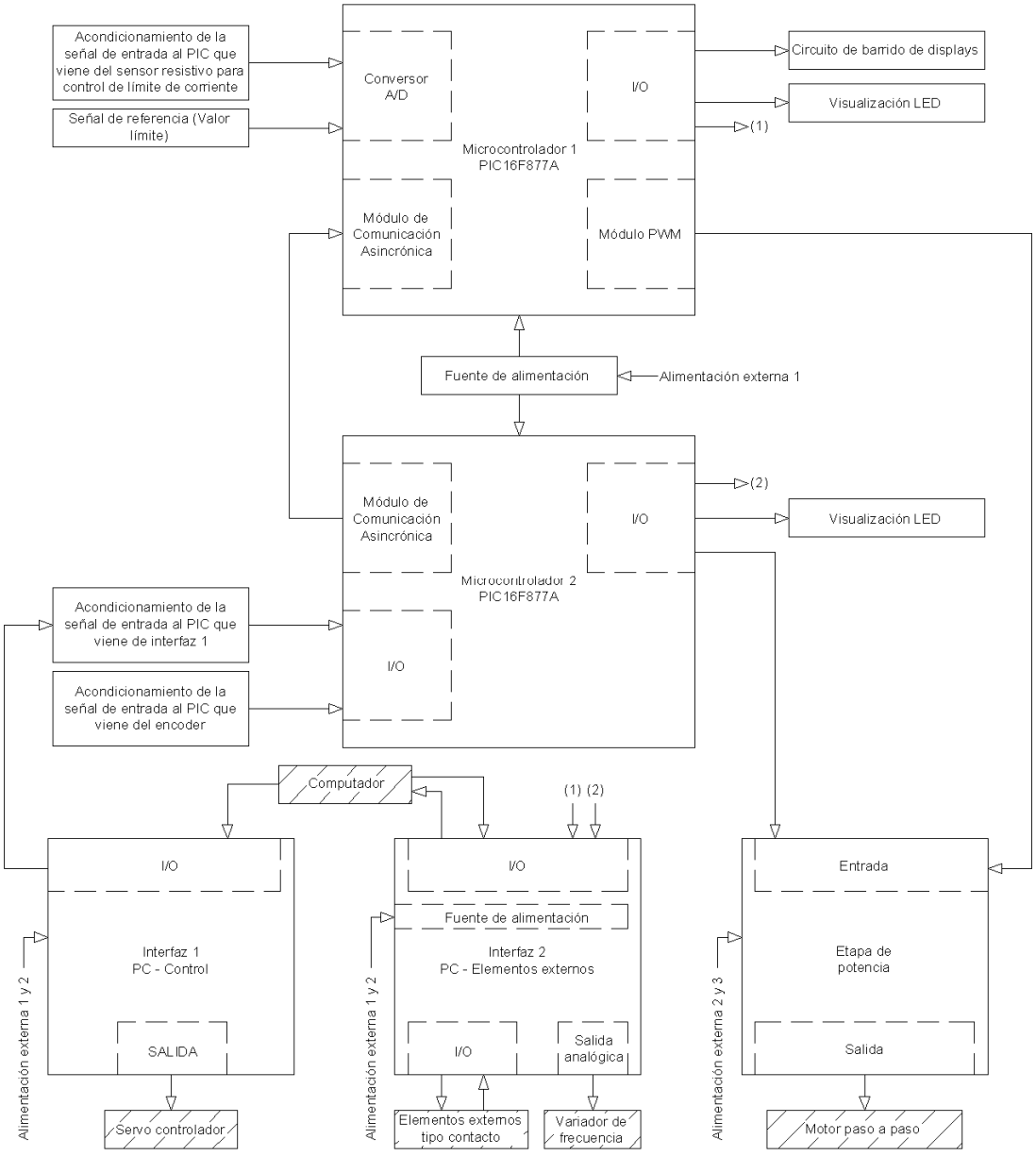


Figura 2.2 Diagrama de bloques del sistema eléctrico

El sistema eléctrico esta compuesto principalmente por 2 módulos de control, cada uno con 3 tarjetas electrónicas, 2 tarjetas de potencia para manejo de los

motores paso a paso y 2 tarjetas interfaz. En la Figura 2.2 se puede apreciar un diagrama de bloques global de las partes del sistema eléctrico y su interconexión.

2.2.1 CIRCUITO DE CONTROL 1 (VISUALIZACIÓN/CORRIENTE)

El presente circuito corresponde al sistema con microcontrolador 1 (PIC16F877A) mostrado en la Figura 2.2, su función es la de recibir información de posición enviada por el microcontrolador 2, efectuar el debido procesamiento de los datos y mostrar en el circuito de barrido de displays el valor de posición absoluta en milímetros ([mm]); además se encarga de realizar el control de límite de corriente, a través del procesamiento de información de corriente del motor de pasos, debidamente acondicionada e ingresada por el módulo de conversión analógico/digital, para ello se ingresa otra señal analógica de referencia de límite de corriente al módulo A/D. El circuito de control 1 presenta un visualizador tipo LED para indicar un fallo de sobrecorriente. Para su diseño se ha dividido en 3 subcircuitos mencionados a continuación.

2.2.1.1 Acondicionamiento de señal de referencia, visualización LED, circuito del microcontrolador.

Para ajustar el límite de corriente que circulará a través del motor paso a paso, se utilizó un circuito de acondicionamiento mediante un potenciómetro (RV1), para dar un valor de voltaje de referencia y un capacitor (C7) para estabilizar el voltaje que ingresa al PIC, Figura 2.3.
Donde Vcc = 5V, RV1 = 10K, valor que se asume para consumir poca corriente de la fuente y C7 = 1uF, para estabilizar el voltaje, dato obtenido experimentalmente.

Para la visualización de un fallo de sobrecorriente, se utilizó un indicador LED, su acondicionamiento está dado a través de una resistencia (R10) cuyo valor escogido es de 330Ω, Figura 2.3., para que circule una corriente mínima de 10 mA a través del LED [17].

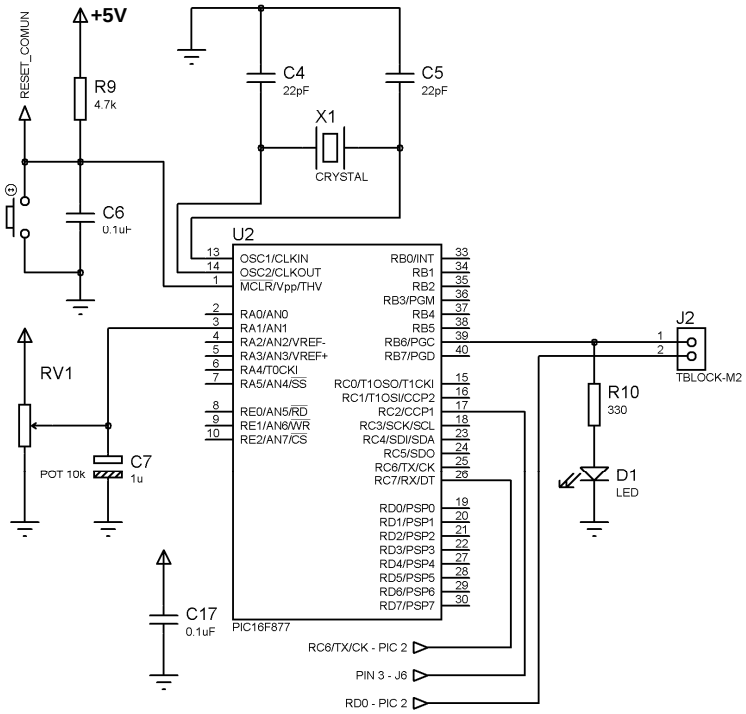


Figura 2.3 Acondicionamiento de señal de referencia, visualización LED, circuito del microcontrolador

El microcontrolador constituye el elemento principal del circuito de control 1, ya que se encarga de ejecutar las acciones de control de límite de corriente y de procesar la información de posición absoluta para visualizarla. A continuación se presenta la distribución de pines del microcontrolador PIC16F877A.

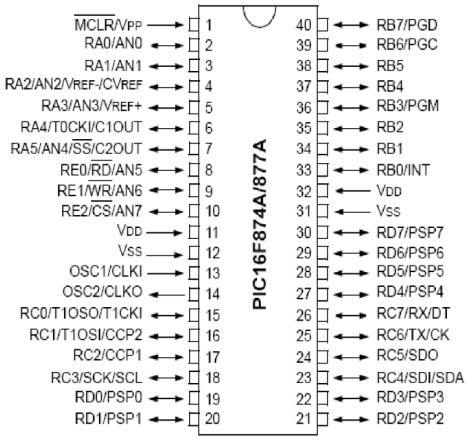


Figura 2.4 Distribución de pines del microcontrolador PIC16F877A

La Tabla 2.1 contiene una descripción de los pines de entrada/salida utilizados del microcontrolador para efectuar el control.

Tabla 2.1 Pines utilizados del microcontrolador 1 PIC16F877A

PIN	E/S	A/D	Descripción
RA0	Entrada	Analógica	Sensado de corriente
RA1	Entrada	Analógica	Referencia de corriente límite
RB0	Salida	Digital	Maneja segmento “g” de display 1
RB1	Salida	Digital	Maneja ánodo común de display 6
RB2	Salida	Digital	Maneja ánodo común de display 5
RB3	Salida	Digital	Maneja ánodo común de display 4
RB4	Salida	Digital	Maneja ánodo común de display 3
RB5	Salida	Digital	Maneja ánodo común de display 2
RB6	Salida	Digital	Visualizador LED de sobrecorriente
RC2	Salida	Digital	Control de corriente
RC7	Entrada	Digital	Recepción serial de datos
RD0	Salida	Digital	Maneja segmento “a” de displays 2 a 6
RD1	Salida	Digital	Maneja segmento “b” de displays 2 a 6
RD2	Salida	Digital	Maneja segmento “c” de displays 2 a 6
RD3	Salida	Digital	Maneja segmento “d” de displays 2 a 6
RD4	Salida	Digital	Maneja segmento “e” de displays 2 a 6
RD5	Salida	Digital	Maneja segmento “f” de displays 2 a 6
RD6	Salida	Digital	Maneja segmento “g” de displays 2 a 6

Se necesitan dos circuitos externos al microcontrolador para que éste funcione correctamente, un circuito de reset conformado por R9 de 4.7kΩ, C6 de 0.1uF y un pulsador, Figura 2.3, estos valores son recomendados por el fabricante; además requiere de un circuito oscilador, conformado por dos capacitores (C4, C5) de 22pF y un cristal de cuarzo (X1) de 20MHz, Figura 2.3, de igual manera estos valores son recomendados por el fabricante.

Se coloca un capacitor (C17) de 0.1uF cercano a los pines de fuente de voltaje del microcontrolador para filtrar señales de radio-frecuencia que pueden afectar al desempeño del microcontrolador.

2.2.1.2 Circuito de barrido de displays.

El circuito de barrido de displays Figura 2.5, se utiliza en el sistema, para visualizar la información de posición absoluta en milímetros (±000.00 mm). Para ello se tiene 6 displays ánodo común (DISP1 a DISP6), 5 transistores PNP (Q8 a Q12) que manejan los pines ánodo común y 7 transistores NPN (Q1 a Q7) que manejan los 7 segmentos de cada display, al utilizar transistores se limita la corriente que circula a través de los pórticos del microcontrolador.

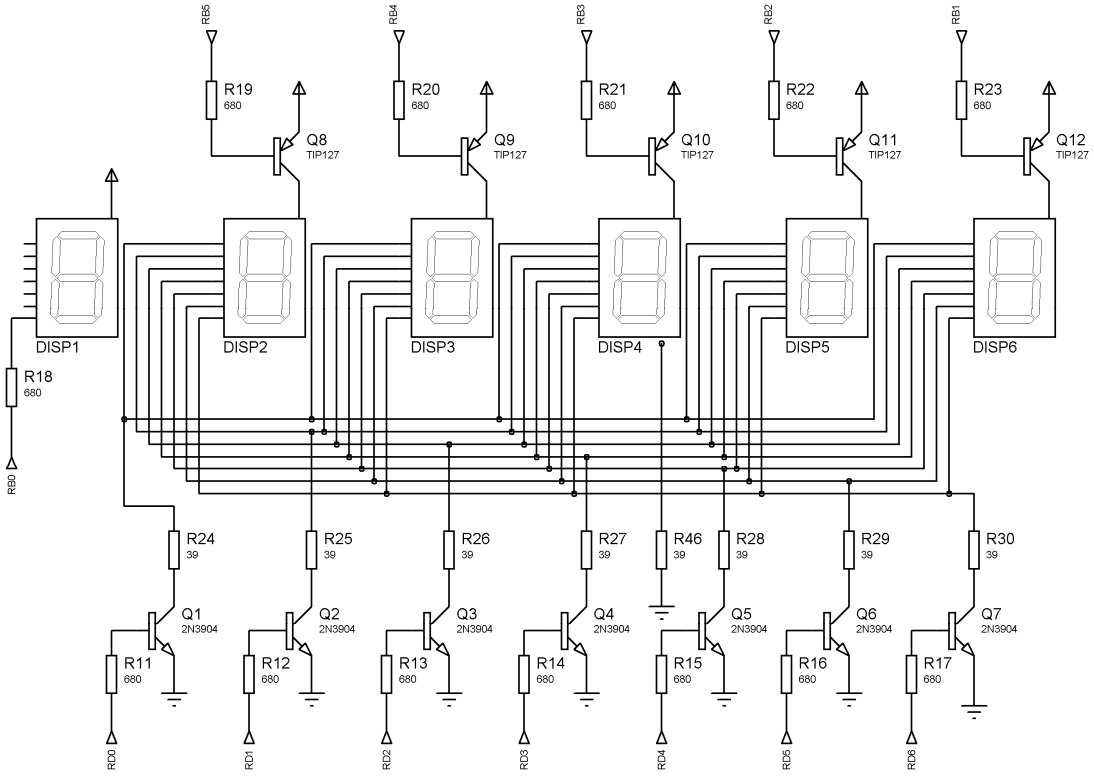


Figura 2.5 Circuito de barrido de displays

Se utiliza un display (DISP1) para mostrar el signo del valor de desplazamiento absoluto en milímetros, para ello se activa o no el segmento “g” a través de una resistencia (R18) conectada a una salida del microcontrolador, entonces:

se selecciona $I_{SEGMENTO}$ de 5mA, $V_{SEGMENTO} \approx 2V$;

$$R18 = \frac{V_{CC} - V_{SEGMENTO}}{I_{SEGMENTO}};$$

$$R18 = \frac{5V - 2V}{5mA} = 600\Omega;$$

valor estándar 680 Ω.

Para calcular los elementos que manejan los display restantes (DISP2, DISP3, DISP4, DISP5, DISP6), Figura 2.5, se debe considerar que estos funcionan con una relación de trabajo (δ) aproximada de 1/6, además, se asume una caída de voltaje máxima en el segmento de 2.5V y una corriente promedio en el segmento de 6mA para limitar el consumo de corriente, entonces:

$V_{SEG\ MAX}$ = 2.5V;

$$I_{SEG\ MAX} = \frac{I_{SEG\ PROMEDIO}}{\delta};$$

$$I_{SEG\ MAX} = \frac{6mA}{1/6} = 36mA;$$

$$R24 = \frac{V_{CC} - V_{EC\ CSAT\ Q8} - V_{SEG\ MAX} - V_{CE\ SAT\ Q1}}{I_{SEG\ MAX}};$$

$$R24 = \frac{5V - 1V - 2.5V - 0.2V}{36mA} = 36.1\Omega;$$

valor estándar, R24 = R25 = R26 = R27 = R28 = R29 = R30 = 39Ω.

$$R46 = \frac{V_{CC} - V_{EC\ CSAT\ Q10} - V_{SEG\ MAX}}{I_{SEG\ MAX}};$$

$$R46 = \frac{5V - 1V - 2.5V}{36mA} = 41.6\Omega;$$

valor estándar 39 Ω.

Se selecciona al transistor 2N3904 como Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7, ya que $I_{SEG\ MAX}$ = 36mA y Vcc = 5V.

Se escoge al transistor TIP127 como Q8, Q9, Q10, Q11, Q12, ya que es un transistor darlington de alta ganancia, que permitirá manejar el pin ánodo común de cada display.

Si se considera que $V_{BE\ SAT} \approx 0.7V$, $\beta_{SAT} \approx \frac{\beta}{10}$, $\beta \approx 100$, para un transistor de señal 2N3904, entonces:

$$R11 = \frac{V_{OUT\ MAX} - V_{BE\ SAT\ Q1}}{\frac{I_{C\ MAX\ Q1}}{\beta_{SAT}}};$$

$$R11 = \frac{5V - 0.7V}{\frac{36mA}{10}} = 1.19k\Omega;$$

para asegurar que se trabaje en la zona de saturación se selecciona una resistencia menor a la calculada;

R11 = R12 = R13 = R14 = R15 = R16 = R17 = 680Ω.

Para los transistores darlington TIP127, se asume $V_{BE\ SAT} \approx 0.7V$, $\beta_{CSAT} \approx \frac{\beta}{10}$, $\beta \approx 1000$, por lo que:

$$R19 = \frac{V_{OUT\ MAX} - V_{BE\ CSAT}}{\frac{7 \cdot I_{SEG\ MAX}}{\beta_{CSAT}}};$$

$$R19 = \frac{5V - 0.7V}{\frac{7 \cdot 36mA}{100}} = 1.71k\Omega;$$

para asegurar que se trabaje en la zona de cuasi saturación se selecciona una resistencia menor a la calculada;

R19 = R20 = R21 = R22 = R23 = 680Ω.

2.2.1.3 Acondicionamiento para sensado de corriente.

El circuito de la Figura 2.6 se utiliza para acondicionar la señal de voltaje proveniente de una resistencia de sensado de corriente, ubicada en el circuito de potencia que maneja al motor paso a paso, para ello se diseñó un circuito amplificador diferencial, basado en amplificador operacional.

Las resistencias R1 = R2 y R42 = R43, permiten acondicionar el voltaje de entrada hacia los amplificadores operacionales U1:A y U1:B, para mantenerlos dentro del rango de -12V hasta +12V, ya que el diferencial de voltaje proviene de un circuito que maneja aproximadamente +35V; el conjunto de las resistencias mencionadas anteriormente y los capacitores C1 = C2, permiten estabilizar la señal que ingresa a los amplificadores operacionales.

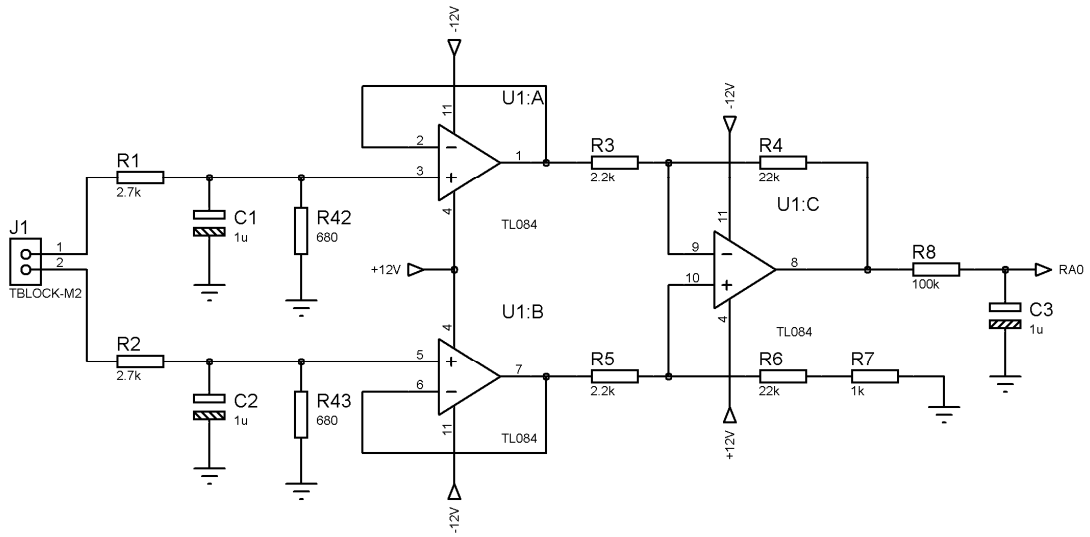


Figura 2.6 Acondicionamiento para sensado de corriente

La peor condición es que se sumen los valores de voltaje de +12V de este circuito con +35V del circuito de potencia teniendo un máximo de +47V que podrían ingresar por J1, ya sea en el punto J1-1 o J1-2, es por esta razón que se ha escogido un 20% como voltaje máximo en los puntos U1:A-3 (pin 3 de circuito

integrado U1) ó U1:B-5 (pin 5 de circuito integrado U1) del amplificador operacional. De esta manera +9.4V representaría el 20% de +47V; entonces:

$V_{R42} = 0.2 \cdot V_{1\,J1}$;

$V_{R42} = R42 \cdot I_{R42}$;

$V_{1\,J1} = (R1 \cdot I_{R1}) + V_{R42}$;

$I_{R1} \approx I_{R42}$;

se asume R1 = 2.7kΩ (valor relativamente alto para no consumir mucha corriente);

$V_{1\,J1} = (2.7\ k\Omega \cdot I_{R1}) + V_{R42}$;

$\frac{V_{R42}}{0.2} = (2.7\ k\Omega \cdot I_{R1}) + V_{R42}$;

$5 \cdot R42 \cdot I_{R1} = (2.7k\Omega \cdot I_{R1}) + R42 \cdot I_{R1}$;

$4 \cdot R42 = 2.7k\Omega$;

$R42 = 675\Omega$;

valor estándar, R42 = R43 = 680Ω

Se utilizan dos capacitores (C1, C2) de 1uF para dar estabilidad a la señal de voltaje que ingresa hacia el amplificador operacional, dato obtenido experimentalmente.

U1:A y U1:B están utilizados como seguidores de voltaje; luego de los mismos se tiene un amplificador diferencial básico, de ganancia $G = \frac{R4}{R3}$; ya que la etapa anterior posee una ganancia aproximada de 0.2 y se desea una ganancia total de 2 entonces G debe ser 10; para ello se asume R4 = R6 = 22kΩ.

$G = \frac{R4}{R3}$;

$R3 = \frac{R4}{G} = \frac{22k\Omega}{10} = 2.2k\Omega$;

R3 = R5 = 2.2kΩ

R7 sirve para desplazar el nivel de tensión de salida, con el objetivo de evitar voltajes negativos resultantes del circuito amplificador diferencial, Figura 2.6.

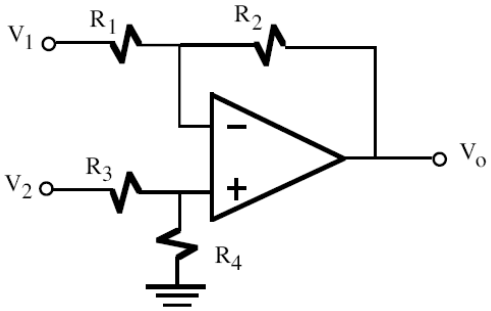


Figura 2.7 Circuito amplificador diferencial

De acuerdo al circuito de la Figura 2.7 el voltaje de salida está dado por la siguiente fórmula:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1\right)$$

Como se puede observar en el circuito de la Figura 2.7, si se desea que el voltaje de salida (V_o) sea más positivo se requiere que el término que contiene V_2, sea mayor que el término que contiene V_1, para lo cual se debe incrementar el factor de amplificación de V_2, dado por las resistencias R3 y R4, para ello se aumenta el valor de la resistencia R4, considerando que no se debe afectar las relaciones de igualdad R1 = R3 y R2 = R4, por lo tanto R4' debe ser aproximadamente igual a R4 pero de mayor valor, si se emplea estos criterios para el circuito de la Figura 2.6, se tiene que R7 debe ser mucho menor que R6, por lo tanto:

se asume R6 igual a 20 veces R7, entonces:

$R6 = 20 \cdot R7;$

$$R7 = \frac{R6}{20};$$

$$R7 = \frac{22k\Omega}{20} = 1.1k\Omega;$$

valor estándar R7 = 1kΩ.

R8 y C3 conforman un filtro pasa bajos; ya que es un filtro RC su frecuencia de corte esta dada por la siguiente fórmula:

$$f_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C};$$

si se considera que la frecuencia de corte es 1Hz y se asume R8 = 100kΩ se tiene:

$$C3 = \frac{1}{f_C \cdot 2 \cdot \pi \cdot R8};$$

$$C3 = \frac{1}{1Hz \cdot 2 \cdot \pi \cdot 100k\Omega} = 1.5uF;$$

valor estándar C3 = 1uF

2.2.2 CIRCUITO DE CONTROL 2 (POSICIÓN)

El circuito de control 2 corresponde al sistema con microcontrolador 2 (PIC16F877A) mostrado en la Figura 2.2, se encarga de receptar las señales A y B proporcionadas por el encoder, así como las señales de dirección y pulsos enviadas por el computador, luego de acondicionarlas para que sean legibles por el microcontrolador, éste hace el debido procesamiento para obtener la secuencia de estados que permitirán controlar al motor de pasos; además posee un visualizador LED que muestra si el error de posición es muy alto. Para su diseño se lo ha dividido en 3 partes.

2.2.2.1 Acondicionamiento de señales A y B de encoder, visualización LED, circuito del microcontrolador.

Debido a las características eléctricas de las señales proporcionadas por el encoder, es necesario acondicionarlas para que el microcontrolador las acepte

como válidas, para ello se requiere de un circuito conformado por R31, Q13, R32, U4:A, R33, Figura 2.8, el cual recibe una señal tipo pulso con una amplitud de 12V, a través del transistor (Q13) se baja el nivel de voltaje a 5V aproximadamente y con la compuerta no inversora (U4:A) se obtiene 5V necesarios para que el microcontrolador trabaje correctamente.

Ya que el buffer 7407 (U4:A, U4:B) es de alta impedancia (consume una corriente de entrada en nivel alto de 20uA, según la hoja de datos), se asume una corriente para R35 de 10mA; entonces se selecciona al TBJ 2N3904 como Q13 = Q14; por lo que:

$$R35 = \frac{V_{CC} - V_{CE\ SAT\ Q14}}{I_{R35}};$$

$$R35 = \frac{5V - 0.2V}{10mA} = 480\Omega;$$

valor estándar $R35 = R32 = 470\Omega$.

$$R34 = \frac{V_{2\ J5} - V_{BE\ SAT} - V_{R35}}{I_{R34}};$$

$$R34 = \frac{12V - 0.7V - 4.8V}{\frac{I_{R35}}{\beta_{SAT}}};$$

$$R34 = \frac{6.5V}{\frac{10mA}{10}} = \frac{6.5V}{1mA} = 6.5k\Omega;$$

para asegurar el estado de saturación se selecciona un valor de resistencia menor, por lo que:

R34 = R31 = 4.7kΩ

Ya que la corriente de salida máxima del buffer en estado bajo es 40mA según la hoja de datos, se asume una corriente sobre R36 igual a 2mA, por lo que:

$$R36 = \frac{V_{CC} - V_{OL}}{I_{R36}};$$

$$R36 = \frac{5V - 0.4V}{2mA} = 2.3k\Omega;$$

valor estándar R36 = R33 = 2.7kΩ

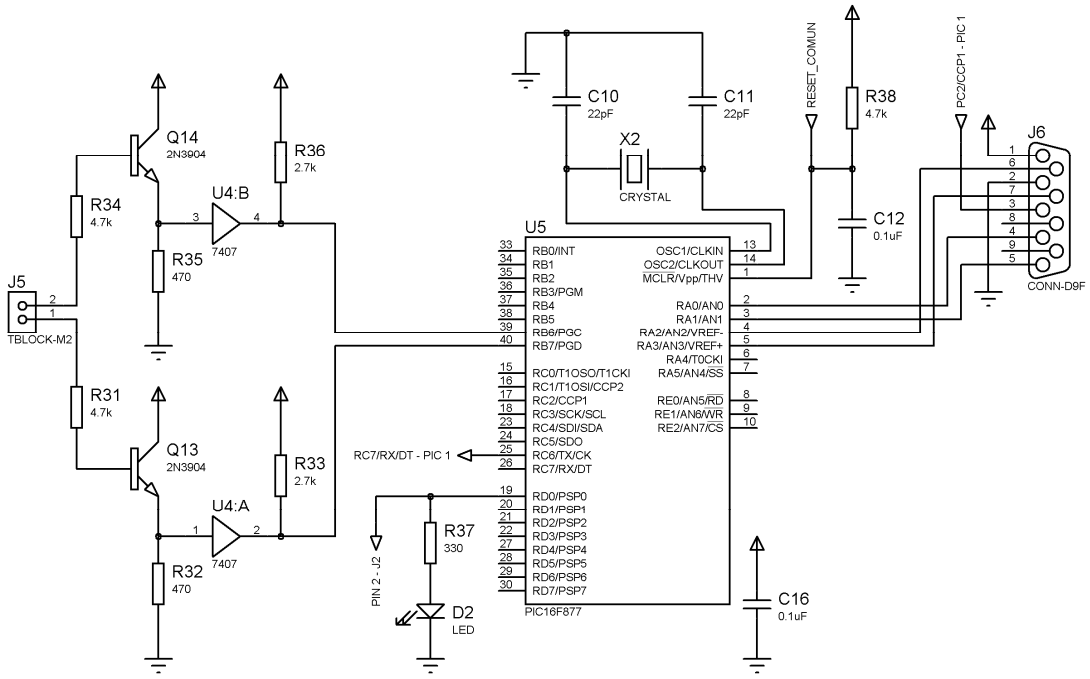


Figura 2.8 Acondicionamiento de señales de encoder, visualización LED, circuito del microcontrolador

Se utiliza un indicador LED como visualización de error de posición excesivo, para seleccionar el elemento de su acondicionamiento se sigue el criterio mencionado anteriormente.

Donde R37 = 330Ω (Figura 2.8).

El elemento principal del circuito de control 2 es el microcontrolador, ya que ejecuta las acciones de control para comandar al motor de pasos y de procesar la información proveniente de las señales del encoder y del computador.

La Tabla 2.2 contiene una descripción de los pines de entrada/salida utilizados del microcontrolador 2.

Tabla 2.2 Pines utilizados del microcontrolador 2 PIC16F877A

PIN	E/S	A/D	Descripción
RA0	Salida	Digital	Control motor paso a paso
RA1	Salida	Digital	Control motor paso a paso
RA2	Salida	Digital	Control motor paso a paso
RA3	Salida	Digital	Control motor paso a paso
RB0	Entrada	Digital	Habilitación del controlador
RB4	Entrada	Digital	Señal de dirección computador
RB5	Entrada	Digital	Señal de pulsos computador
RB6	Entrada	Digital	Señal B de encoder
RB7	Entrada	Digital	Señal A de encoder
RC6	Salida	Digital	Transmisión serial de datos
RD0	Salida	Digital	Visualizador LED de exceso de error de posición

De igual manera se emplea los criterios de selección utilizados en el sistema microprocesado diseñado anteriormente, para dimensionar los elementos de los circuitos de reset y de oscilación, requeridos por el microcontrolador.
Donde X2 = 20 MHz, C10 = C11 = 22 pF, C12 = 0.1 uF, R38 = 4.7 kΩ. Figura 2.8.

Se sitúa un capacitor (C16) de 0.1uF cercano a los pines de fuente de voltaje del microcontrolador para filtrar señales de radio-frecuencia que pueden afectar el comportamiento del microcontrolador.

2.2.2.2 Acondicionamiento de señales Pulsos, Dirección y Habilitación

El circuito de acondicionamiento mostrado en la Figura 2.9, recibe las señales del circuito interfaz 1, Figura 2.2, estas son filtradas y amplificadas en el caso de que así lo necesiten, para obtener a la salida del circuito una señal confiable con una amplitud máxima de 5V, requerido por el microcontrolador.

El circuito conformado por los elementos U4:C y R39, se diseña con los criterios mencionados en el sub capítulo anterior, pero se asume una corriente sobre R39 de 0.2mA para reducir el consumo de corriente, entonces:

$$R39 = \frac{V_{CC} - V_{OL}}{I_{R39}};$$

$$R39 = \frac{5V - 0.4V}{0.2mA} = 23k\Omega;$$

valor estándar R39 = R40 = R41 = 27kΩ

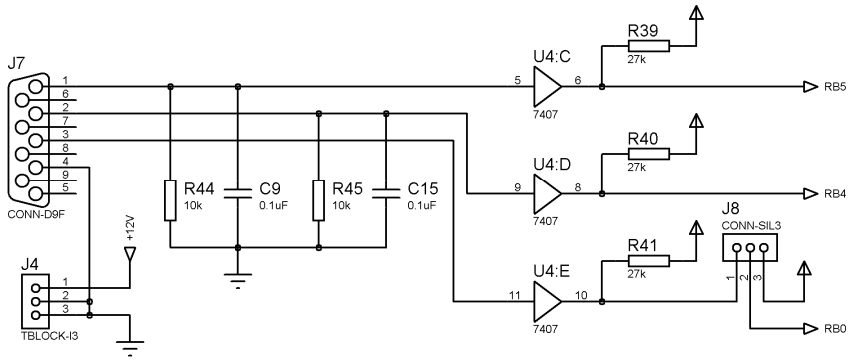


Figura 2.9 Acondicionamiento de señales de pulsos, dirección y habilitación

Se utiliza un conector de tres vías (CONN-SIL3), para tener dos opciones mediante un jumper, la primera opción permite controlar la habilitación/deshabilitación desde una salida del pórtico paralelo del computador y la otra opción habilita permanentemente al controlador del motor de pasos.

Las resistencias R44 y R45 sirven como resistencias de pull-down, esto quiere decir que fijan el voltaje 0V si no hay conexión en la entrada. Para no consumir una corriente elevada del circuito interfaz 1 el cual proporciona la señal de entrada (0V ó 5V), se asume una corriente de 0.5mA en estado de entrada alto, entonces:

$$R44 = \frac{V_{OH\,PC}}{I_{R44}};$$

$$R44 = \frac{5V}{0.5mA} = 10k\Omega;$$

$$R44 = R45 = 10k\Omega$$

Los capacitores C9 y C15 de 0.1uF, permiten filtrar ruido de radiofrecuencia.

2.2.2.3 Fuente de alimentación

Se utiliza una fuente conmutada de computador (alimentación externa 1, Figura 2.2) para suministrar energía eléctrica a los circuitos de control. Como se utiliza las líneas +12V, 0, -12V de la fuente, se regula el voltaje +12V a +5V requeridos por el microcontrolador y circuitos integrados como el buffer 7407, con un circuito integrado 7805 (U3), Figura 2.10.

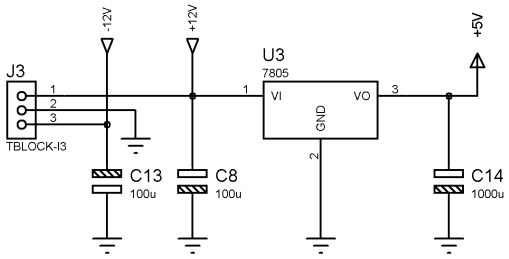


Figura 2.10 Fuente de alimentación

Se coloca capacitores (C14, C8 = C13) de 1000uF, 100uF respectivamente, para dar mayor estabilidad al voltaje regulado, los valores seleccionados son recomendados por el fabricante.

2.2.3 CIRCUITO DE POTENCIA

El circuito de potencia cumple la función de amplificar las señales provenientes de los circuitos de control para manejar un motor de pasos; consta de circuitos integrados, opto acopladores para aislar la etapa de control con la etapa de potencia, además incluye la resistencia de sensado de corriente cuya potencia es alta, ya que por ella circula la corriente consumida por el motor de pasos.

Se utilizan capacitores (C4, C5) de 100uF, Figura 2.11, para dar estabilidad a las fuentes de voltaje +5V y +12V procedentes de la alimentación externa 2, Figura 2.2, constituida por una fuente conmutada de computador.

Se colocan capacitores (C2, C3) de 0.1uF, Figura 2.11, para filtrar ruido de radio frecuencia, que puede afectar al funcionamiento del circuito.

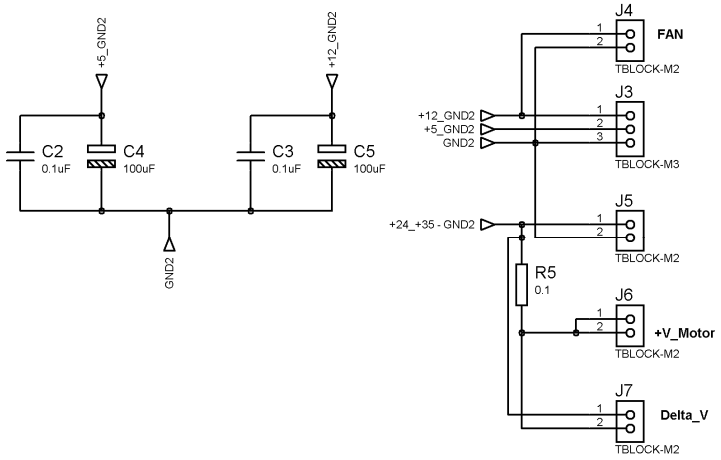


Figura 2.11 Resistencia de sensado y capacitores de filtro de circuito de potencia

La resistencia de potencia (R5) de 0.1Ω, Figura 2.11, sirve para sensar la corriente del motor de pasos, se selecciona un valor bajo menor a la unidad para obtener un diferencial de voltaje mínimo que no afecte al voltaje entregado al motor; ya que se esta trabajando con una corriente aproximada del motor de 6A, entonces se tiene:

$$P = I^2 \cdot R;$$

$$P = (6A)^2 \cdot 0.1\Omega = 3.6W;$$

se selecciona una resistencia que soporte más o menos el doble del valor de potencia calculado;

R5 = 0.1Ω, 7.2W;

valor estándar, R5 = 0.1Ω, 10W

El circuito de la Figura 2.12 corresponde al circuito de potencia, se puede apreciar de izquierda a derecha, la etapa de control conformada por los circuitos integrados de compuertas AND y No-Inversoras, la etapa de aislamiento eléctrico y la etapa de amplificación de corriente.

Se emplea un capacitor (C9) de 0.1uF, para filtrar ruido de radio frecuencia.

Las compuertas lógicas AND del circuito integrado (U1) 7408, permiten mezclar las señales de control, de los micro pasos, con la señal de control de límite de corriente.

De acuerdo a la hoja de datos del opto acoplador NTE3087, se observa que para una corriente de 10mA se tiene una caída de voltaje sobre el diodo LED de 1.65V, entonces:

$$R1 = \frac{V_{CC} - V_{LED}}{I_{R1}};$$

$$R1 = \frac{5V - 1.65V}{10mA} = 335\Omega;$$

valor estándar R1 = R6 = R10 = R14 = 330Ω.

Se utiliza un buffer (U6) 7407, para manejar la corriente requerida por las resistencias R1, R6, R10, R14 al momento de tener un 0 lógico a la salida del buffer; la corriente máxima que soporta el buffer 7407 en su salida con 0 lógico es de 40mA, entonces no se tiene problema de manejar 14mA por cada resistencia (R1, R6, R10, R14);

$$I_{R1} = \frac{V_{CC} - V_{OL}}{R1};$$

$$I_{R1} = \frac{5V - 0.4V}{330\Omega} = 14mA$$

Se coloca capacitores (C1, C6, C7, C8) de 0.1uF, para filtrar ruido de radio frecuencia, que puede afectar el funcionamiento de los opto acopladores.

Se selecciona al opto acoplador NTE3087 como U2, U3, U4, U5, ya que se caracteriza por su alta velocidad, además entrega señales cuadradas, filtradas y con tiempos de conmutación muy bajos.

Ya que el opto acoplador NTE3087 es de colector abierto y soporta una corriente máxima de 50mA, para el cálculo de R2 se asume una corriente de 8mA, por lo tanto:

$$R2 = \frac{V_{CC} - V_{OL}}{I_{R2}};$$

$$R2 = \frac{5V - 0.4V}{8mA} = 575\Omega;$$

valor estándar, R2 = R7 = R11 = R15 = 560Ω.

Se selecciona al transistor 2N3904 como Q1, Q3, Q5, Q7, ya que maneja una corriente máxima en el colector de 100mA; se asume una corriente de trabajo de 50mA, por lo tanto:

$$R4 = \frac{V_F - V_{CE\ SAT\ Q1}}{I_{R4}};$$

$$R4 = \frac{12V - 0.2V}{50mA} = 236\Omega;$$

valor estándar, R4 = 220Ω;

su potencia máxima es:

$$P = \frac{V^2}{R};$$

$$P = \frac{(12V - 0.2V)^2}{220\Omega} = 0.63W;$$

Se selecciona un resistor que soporte por lo menos el doble del valor calculado, un valor estándar es, R4 = R9 = R13 = R17 = 220Ω, 5W.

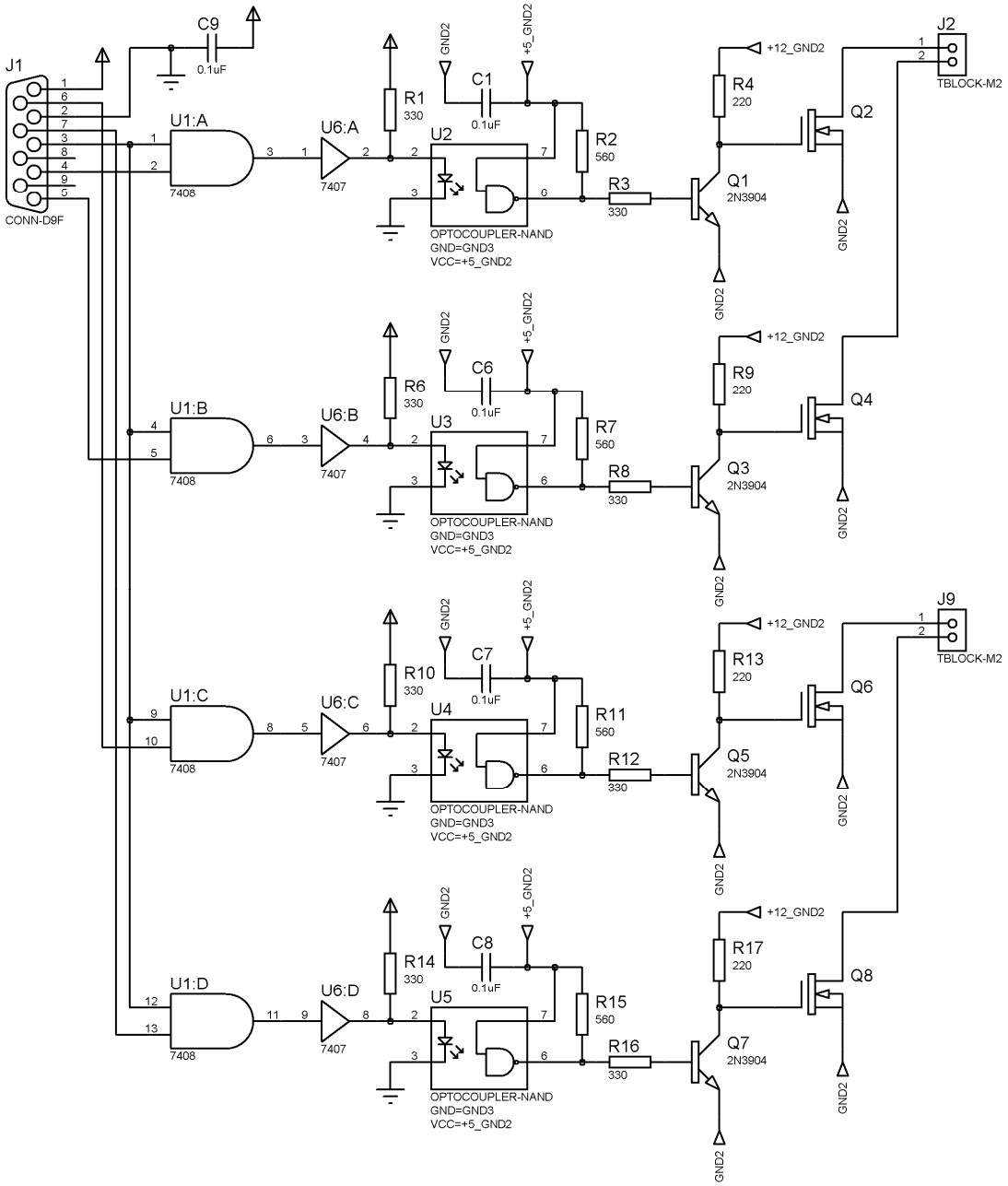


Figura 2.12 Circuito de potencia

Como se debe manejar una corriente máxima aproximada de 6A, se selecciona mosfets que soporten una cantidad mayor de corriente; por lo que se escoge al

mosfet NTE66 como Q2, Q4, Q6, Q8, el cual soporta una corriente de drenaje máxima de 12A.

2.2.4 CIRCUITO INTERFAZ 1 (PC-CONTROL)

El circuito interfaz 1 cumple la función de acondicionar las señales enviadas por el computador, para entregarlas al controlador de motor de pasos y al servo controlador con las características requeridas por los mismos. Para su diseño se lo ha dividido en 2 secciones.

2.2.4.1 Acondicionamiento de la señal proveniente del computador hacia el circuito de control 2

Se diseñaron estos circuitos con la finalidad de proporcionar una señal con mayor ancho de pulso para evitar problemas de pérdida de pulsos; ya que, los pulsos que provienen de la PC, poseen un ancho de 25us máximo, por este motivo se pueden perder los pulsos al momento de procesar la información en el microcontrolador. Se utilizaron los circuitos integrados 555 en configuración multivibrador monoestable para ampliar el ancho de pulso en función al pulso de entrada; esta configuración responde a la ecuación:

$$T = 1.1 \cdot R \cdot C;$$

donde T es el tiempo del ancho del pulso, R = R4 = R10 y C = C2 = C5; debido a las pruebas realizadas se visualizó en el osciloscopio que 0.6ms de ancho de pulso es un valor adecuado para evitar la pérdida de pulsos. Entonces:

$$T = 1.1 \cdot R4 \cdot C2;$$

si se asume C2 = C5 = 1uF, se tiene que:

$$R4 = \frac{T}{1.1 \cdot C2};$$

$$R4 = \frac{0.6ms}{1.1 \cdot 1uF} = 545\Omega;$$

valor estándar, R4 = R10 = 560Ω.

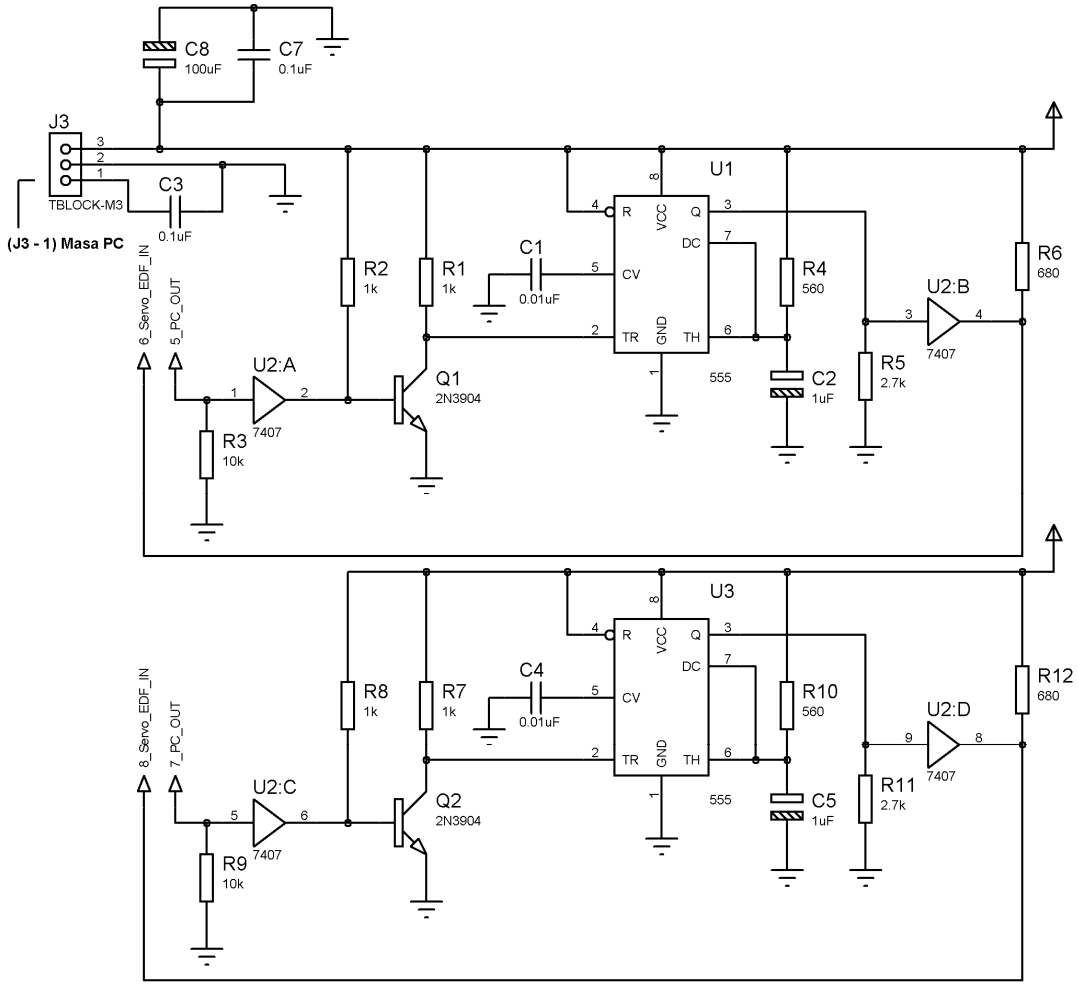


Figura 2.13 Circuito de acondicionamiento para controlador de motor de pasos

El fabricante recomienda colocar un capacitor (C1 = C4) de 0.01uF.

Para el cálculo de la resistencia R1, se asume una corriente sobre la resistencia de 5mA, por lo que:

$$R1 = \frac{V_{CC} - V_{CE\ SAT\ Q1}}{I_{R1}};$$

$$R1 = \frac{5V - 0.2V}{5mA} = 960\Omega;$$

valor estándar, R1 = R7 = 1kΩ.

$$R2 = \frac{V_{CC} - V_{BE\ SAT\ Q1}}{I_{R2}};$$

$$R2 = \frac{5V - 0.7V}{\frac{5mA}{10}} = 8.6k\Omega;$$

para asegurar que se trabaja en la zona de saturación se escoge una resistencia de menor valor, por lo que R2 = R8 = 1kΩ.

Se utiliza un buffer (U2) 7407, para amplificar la corriente que puede manejar el puerto de la impresora de la PC (U2:A, U2:B). Ya que el puerto paralelo de la PC maneja una corriente máxima en estado alto de 2.6mA; se asume una corriente de 0.5mA, entonces:

$$R3 = \frac{V_{OH\ PC}}{I_{R3}};$$

$$R3 = \frac{5V}{0.5mA} = 10k\Omega;$$

R3 = R9 = 10kΩ.

Según la hoja de datos del circuito integrado 555, si se selecciona una corriente de salida de 1.5mA, se tiene que el voltaje de salida en nivel alto es de 3.7V (ver curva característica High Output Voltage vs. Output Source Current), entonces:

$$R5 = \frac{V_{OUT}}{I_{R5}};$$

$$R5 = \frac{3.7V}{1.5mA} = 2.46k\Omega;$$

valor estándar, R5 = R11 = 2.7kΩ

Los buffer U2:B y U2:D, acondicionan las señales provenientes de los circuitos integrados 555.

Ya que los buffer manejan hasta 40mA en estado bajo, se selecciona una corriente de 6mA, entonces:

$$R6 = \frac{V_{CC} - V_{OL}}{I_{R6}};$$

$$R6 = \frac{5V - 0.4V}{6mA} = 766\Omega;$$

valor estándar, R6 = R12 = 680Ω.

Se coloca un capacitor (C8) de 100uF, para dar estabilidad al voltaje regulado de 5V.

Se utiliza un capacitor (C7) de 0.1uF, para filtrar ruido de radio frecuencia.

Se emplea un capacitor (C3) de 0.1uF entre tierra 1 del circuito interfaz 1 (fuente de alimentación 1) y masa o chasis del computador para eliminar ruido electro magnético que puede afectar a las señales procedentes del computador.

2.2.4.2 Acondicionamiento de la señal proveniente del computador hacia el servo controlador

El circuito de la Figura 2.14 recibe las señales del computador, las acondiciona y las envía hacia el servo controlador, y aísla eléctricamente el computador con el servo controlador, mediante opto acopladores.

El puerto paralelo del computador maneja una corriente máxima en estado alto de 2.6mA, entonces:

se asume una corriente de 0.5mA sobre R13;

$$R13 = \frac{V_{OH\,PC}}{I_{R13}};$$

$$R13 = \frac{5V}{0.5mA} = 10k\Omega;$$

R13 = R22 = 10kΩ.

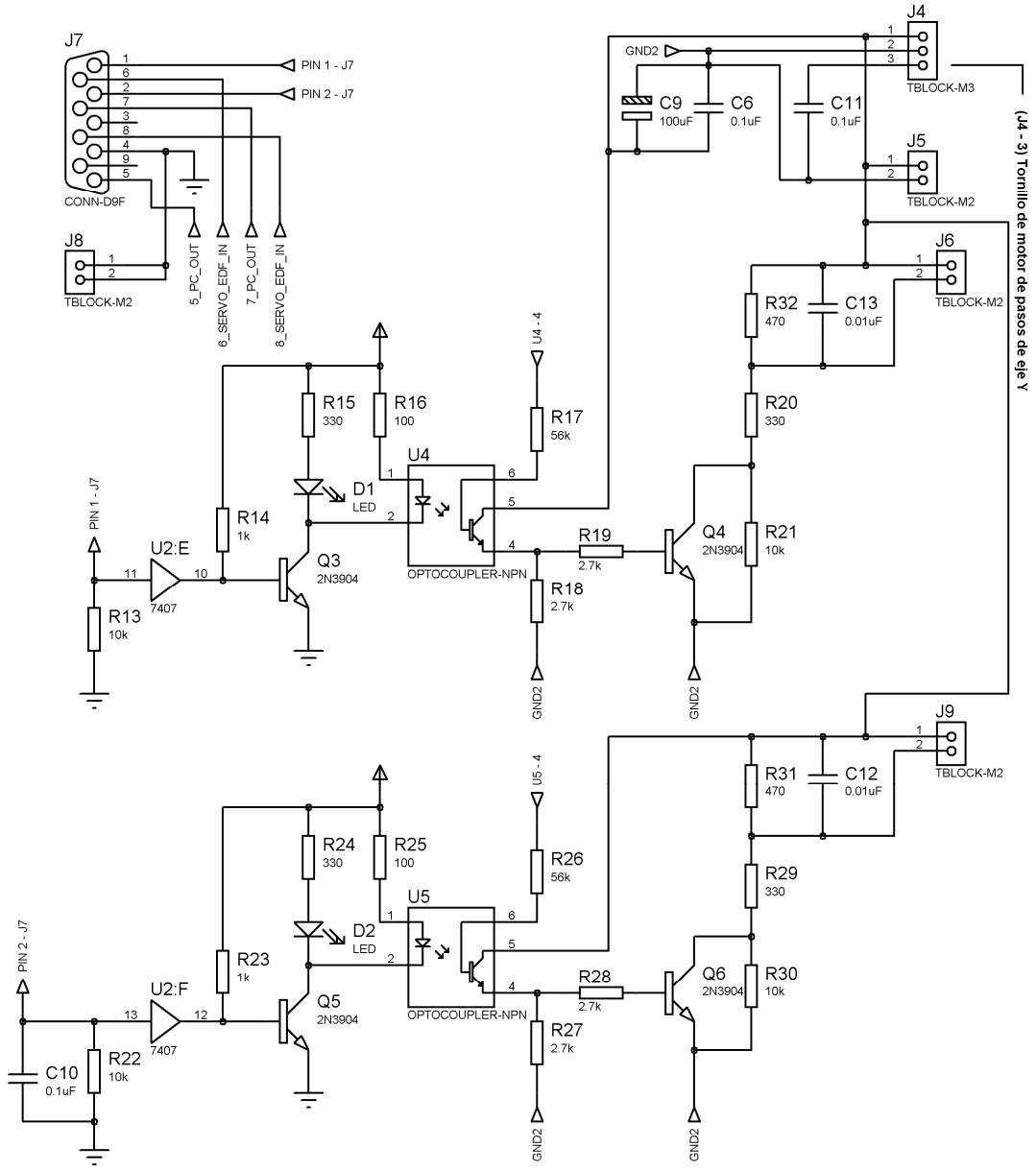


Figura 2.14 Circuito de acondicionamiento para servo controlador

Se utiliza un buffer (U2) 7407, para amplificar la corriente que puede manejar el puerto paralelo del computador (U2:E, U2:F).

De acuerdo a la curva característica del opto acoplador 4N25 (Forward current I_F vs. Forward voltaje V_F), se ve que para una corriente de 30mA se tiene una caída de voltaje sobre el diodo de 1.25V, entonces:

$$R16 = \frac{V_{CC} - V_{F\,U4} - V_{CE\,SAT\,Q3}}{I_{F\,U4}};$$

$$R16 = \frac{5V - 1.25V - 0.2V}{30mA} = 118\Omega;$$

valor estándar, R16 = R25 = 100Ω.

Se utilizan LEDs (D1, D2) como visualizadores para las señales pulsos y dirección del computador; para lo cual, $I_{LED\,MIN}$ = 10mA y $V_{LED} \approx$ 2V [17], entonces:

$$R15 = \frac{V_{CC} - V_{D1} - V_{CE\,SAT\,Q3}}{I_{D1}};$$

$$R15 = \frac{5V - 2V - 0.2V}{10mA} = 280\Omega;$$

valor estándar R15 = R24 = 330 Ω.

Se selecciona al transistor 2N3904 como Q3, Q5, ya que este soporta una corriente de colector aproximada de 100mA, a través de R15 y R16 circula una corriente de 40mA.

$$R14 = \frac{V_{CC} - V_{BE\,SAT\,Q3}}{\frac{I_{R24} + I_{R25}}{\beta_{SAT}}};$$

$$R14 = \frac{5V - 0.7V}{\frac{10mA + 30mA}{10}} = 1.1k\Omega;$$

valor estándar, R14 = R23 = 1kΩ.

Se coloca un capacitor (C10) de 0.1uF para filtrar ruido de radio frecuencia.

Se utilizan opto acopladores de propósito general (U4, U5) 4N25, para aislar eléctricamente el computador del servo controlador.

De acuerdo a la curva característica (Switching time vs. Base-emitter resistance) del opto acoplador 4N25, se tiene que los tiempos más bajos de conmutación se logran con una resistencia entre base y emisor, con un valor aproximado de 60kΩ, por lo que se selecciona una resistencia R17 = R26 igual a 56kΩ.

J6 sirve para conectarse con el servo controlador; la corriente requerida según el manual es de 12mA aproximadamente; la carga para este circuito está constituida por una resistencia de 220Ω, en serie a un LED, por lo que el voltaje de la carga es:

$$V_{CARGA} = (I_{CARGA} \cdot R_{CARGA}) + V_{LED\ CARGA};$$
$$V_{CARGA} = (12mA \cdot 220\Omega) + 2V = 4.64V;$$

si se hace circular una corriente por R32 de 10mA, se tiene:

$$R32 = \frac{V_{CARGA}}{I_{R32}};$$
$$R32 = \frac{4.64V}{10mA} = 464\Omega;$$

valor estándar, R32 = R31 = 470Ω.

$$R20 = \frac{V_{CC} - V_{CARGA} - V_{CE\ SAT\ Q4}}{I_{CARGA} + I_{R32}};$$
$$R20 = \frac{12V - 4.64V - 0.2V}{10mA + 12mA} = 325\Omega;$$

valor estándar, R20 = R29 = 330Ω.

Se selecciona al transistor 2N3904 como Q4, Q6, ya que maneja una corriente de colector aproximada de 100mA, a través de R20 circula una corriente de 22mA.

Cuando el transistor Q4 se encuentra en estado abierto entre colector y emisor, la resistencia R21 debe ser mucho mayor al conjunto R32, R20, para evitar que circule corriente por la carga, entonces:

se asume R21 >> (R32 + R20);
R32 + R20 = 330Ω + 470Ω
R32 + R20 = 800Ω, entonces:
se selecciona, R21 = R30 = 10kΩ.

Como Q4 maneja en el colector una corriente de 22mA, se tiene que:

$$I_{B\,Q4} = \frac{I_{C\,Q4}}{\beta_{SAT}};$$

$$I_{B\,Q4} = \frac{22mA}{10} = 2.2mA$$

Además si se quiere hacer circular una corriente por R18 de 5mA, la carga total del opto acoplador 4N25 sería 7.2mA; según la curva característica (Collector current I_C vs. Collector-emitter voltaje V_{CE}) con una corriente I_F de 30mA y una corriente I_C de 7.2mA, se tiene un voltaje V_{CE}, aproximado de 0.2V; entonces:

$$R18 = \frac{V_{CC} - V_{CE\,U4}}{I_{R18}};$$

$$R18 = \frac{12V - 0.2V}{5mA} = 2.4k\Omega;$$

valor estándar, R18 = R27 = 2.7kΩ.

$$R19 = \frac{V_{CC} - V_{CE\,U4} - V_{BE\,SAT\,Q4}}{I_{R19}};$$

$$R19 = \frac{12V - 0.2V - 0.7V}{2.2mA} = 5k\Omega;$$

para asegurar el estado de saturación se selecciona una resistencia de menor valor;

R19 = R28 = 2.7kΩ.

Como se puede ver en la curva característica (Collector current I_C vs. Collector-emitter voltaje V_{CE}), no se afecta en mayor grado V_{CE} si se aumenta un poco la corriente I_C.

Se utilizan capacitores (C12, C13) de 0.01uF, para filtrar ruido de radio frecuencia, así como C6 de 0.1uF.

Se coloca un capacitor (C9) de 100uF para estabilizar el voltaje regulado que viene de la fuente de +12V.

Se emplea un capacitor (C11) de 0.1uF entre tierra 2 de circuito interfaz 1 (fuente de alimentación 2) y masa o chasis de la máquina fresadora para eliminar ruido electro magnético que puede afectar a las señales que ingresan al servo controlador.

2.2.5 CIRCUITO INTERFAZ 2 (PC-ELEMENTOS EXTERNOS)

El circuito interfaz 2, se encarga de acondicionar las señales tipo contacto procedentes del computador, para manejar relés de 12V, además de acondicionar una salida de tipo PWM, para controlar la velocidad de un motor de inducción a través de un variador de frecuencia, también acondicionan señales de entrada tipo contacto provenientes de elementos como interruptores inductivos, además integra un circuito que permite dar un retardo a la conexión frente a un fallo de los controladores.

Una característica importante que presenta el circuito es el aislamiento eléctrico mediante opto acopladores, para proteger al computador y a los circuitos de control. Para su diseño, se dividió al circuito en 4 partes.

2.2.5.1 Acondicionamiento de la señal proveniente del computador para manejar relés y una salida de tipo PWM.

Los circuitos diseñados a continuación, Figura 2.15, permiten manejar relés de 12V y una salida analógica de 0 a 10VDC, desde el computador.

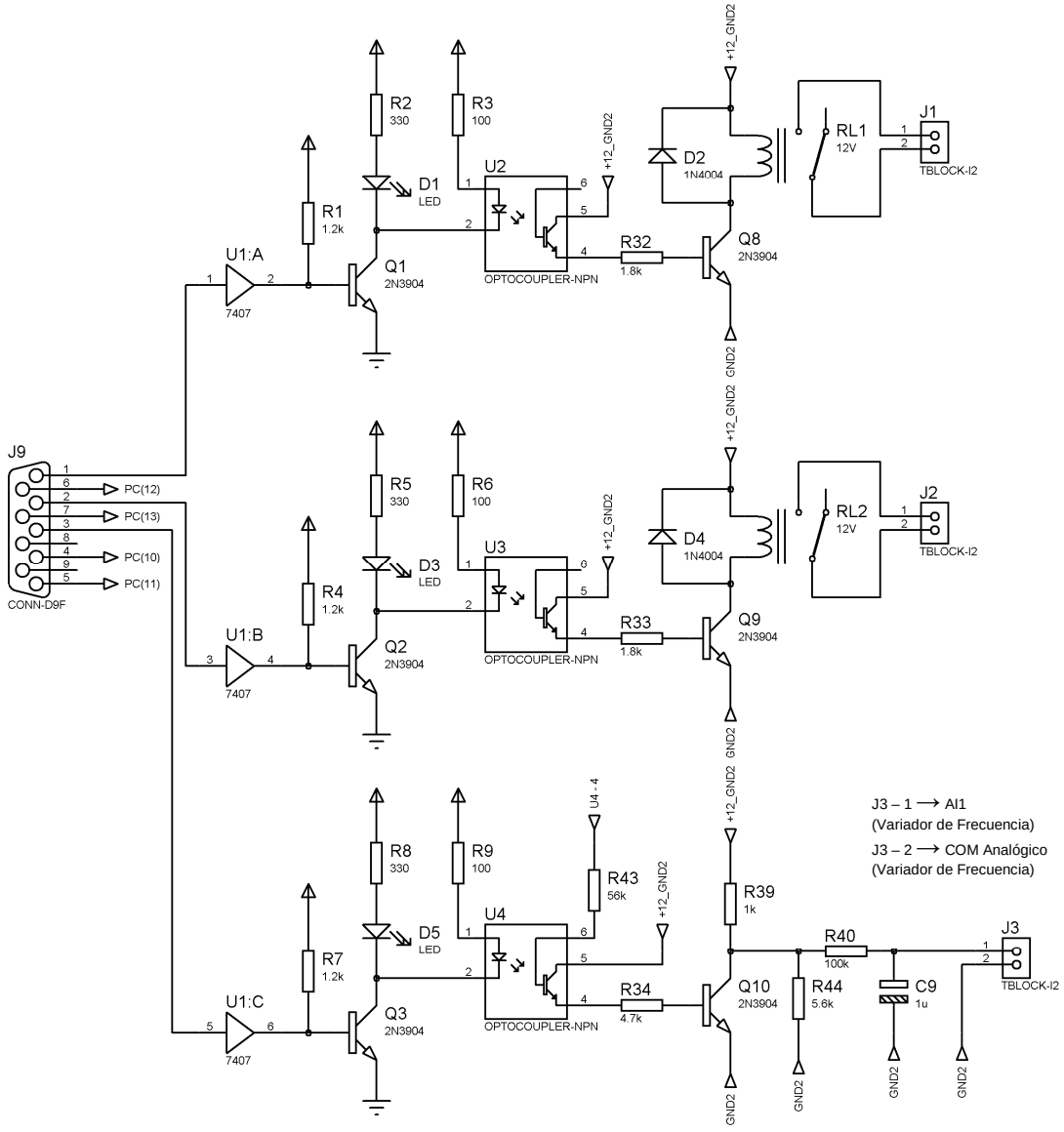


Figura 2.15 Circuito de acondicionamiento para manejar relés y salida analógica

El circuito integrado (U1) 7407, permite amplificar la corriente que puede manejar el puerto de la impresora del computador (U1:A, U1:B, U1:C).

De acuerdo a la curva característica del opto acoplador 4N25 (Forward current I_F vs. Forward voltaje V_F), se observa que para una corriente de 30mA se tiene una caída de voltaje sobre el diodo de 1.25V, entonces:

$$R3 = \frac{V_{CC} - V_{F\,U2} - V_{CE\,SAT\,Q1}}{I_{F\,U2}};$$

$$R3 = \frac{5V - 1.25V - 0.2V}{30mA} = 118\Omega;$$

valor estándar, R3 = R6 = R9 = 100Ω.

Para el acondicionamiento de los indicadores LED (D1, D3, D5), se tiene que:

$I_{LED\,MIN}$ = 10mA y $V_{LED} \approx$ 2V [17], entonces:

$$R2 = \frac{V_{CC} - V_{D1} - V_{CE\,SAT\,Q1}}{I_{D1}};$$

$$R2 = \frac{5V - 2V - 0.2V}{10mA} = 280\Omega;$$

valor estándar, R2 = R5 = R8 = 330 Ω.

Se selecciona al transistor 2N3904 como Q1, Q2, Q3, ya que maneja una corriente de colector de 100mA, a través de las resistencias R2, R3, circula una corriente de 40mA, entonces:

$$R1 = \frac{V_{CC} - V_{BE\,SAT\,Q1}}{\frac{I_{R2} + I_{R3}}{\beta_{SAT}}};$$

$$R1 = \frac{5V - 0.7V}{\frac{10mA + 30mA}{10}} = 1.1k\Omega;$$

valor estándar, R1 = R4 = R7 = 1.2kΩ.

Se utilizan opto acopladores de propósito general 4N25 como U2, U3, U4, para aislar eléctricamente al computador del circuito de relés y salida analógica.

Según la curva característica (Switching time vs. Base-emitter resistance) del opto acoplador 4N25, se tiene que los tiempos de conmutación más cortos se logran con una resistencia entre base y emisor, con un valor aproximado de 60kΩ, es por esto que se selecciona una resistencia R43 de 56kΩ. Los opto acopladores U2 y U3 no requieren de la resistencia entre base y emisor ya que las señales de conmutación cambian de estado lentamente.

Se emplean relés de 12V con contactos NC, NA, COM, como RL1, RL2, para activar/desactivar, cargas eléctricas externas.

Se utilizan diodos 1N4004 (D2, D4) en anti-paralelo a las bobinas de los relés para descargar la corriente almacenada en las mismas.

Se selecciona al transistor 2N3904 como Q8, Q9, Q10, ya que maneja una corriente de colector de 100mA, además se requiere una corriente de colector de 50mA máximo, por lo que la corriente de colector del opto acoplador sería:

$$I_{C\,U2} = I_{B\,Q8};$$

$$I_{C\,U2} = \frac{I_{C\,Q8}}{\beta_{SAT}};$$

$$I_{C\,U2} = \frac{50mA}{10} = 5mA.$$

Según la curva característica del opto acoplador 4N25 (Collector current I_C vs. Collector-emitter voltaje V_{CE}) con una corriente I_F de 30mA y una corriente I_C de 5mA, se tiene un voltaje V_{CE}, aproximado de 0.2V, entonces:

$$R32 = \frac{V_{CC} - V_{CE\,U2} - V_{BE\,SAT\,Q8}}{I_{R32}};$$

$$R32 = \frac{12V - 0.2V - 0.7V}{5mA} = 2.2k\Omega;$$

para asegurar el estado de saturación se escoge una resistencia de menor valor;

R32 = R33 = 1.8kΩ.

Como se puede ver en la curva característica (Collector current I_C vs. Collector-emitter voltaje V_{CE}), no se afecta mucho V_{CE} si se aumenta un poco la corriente I_C.

Las resistencias R39 y R44 conforman un divisor de voltaje que permiten tener una caída de tensión máxima de 10V sobre R44, además se debe considerar que R39 debe consumir una corriente menor a la corriente de colector de Q10, por lo tanto:

se asume R39 = 1kΩ;

$$I_{R39} = \frac{V_{CC} - V_{CE\ SAT\ Q10}}{R39};$$

$$I_{R39} = \frac{12V - 0.2V}{1k\Omega} = 11.8mA$$

si Q10 se encuentra en estado de corte, se tiene que:

$$I_{R44} = I_{R39};$$

$$R44 = \frac{V_{R44}}{I_{R44}};$$

$$R44 = \frac{10V}{\frac{V_{R39}}{R39}};$$

$$R44 = \frac{10V}{\frac{2V}{1k\Omega}} = 5k\Omega;$$

valor estándar, R44 = 5.6kΩ

Debido que R39 maneja una corriente máxima de 11.8mA, se selecciona al transistor 2N3904 como Q10, ya que soporta una corriente de colector de 100mA.

La corriente de colector del opto acoplador U4 sería:

$$I_{C\,U4} = I_{B\,Q10};$$

$$I_{C\,U4} = \frac{I_{C\,Q10}}{\beta_{SAT}};$$

$$I_{C\,U4} = \frac{11.8mA}{10} = 1.18mA;$$

Según la curva característica del opto acoplador 4N25 (Collector current I_C vs. Collector-emitter voltaje V_{CE}) con una corriente I_F de 30mA y una corriente I_C de 1.2mA, se tiene un voltaje V_{CE}, aproximado de 0.2V, entonces:

$$R34 = \frac{V_{CC} - V_{CE\,U4} - V_{BE\,SAT\,Q10}}{I_{R34}};$$

$$R34 = \frac{12V - 0.2V - 0.7V}{1.2mA} = 9.2k\Omega;$$

para asegurar el estado de saturación se escoge una resistencia de menor valor,

$$R34 = 4.7k\Omega$$

Como se puede ver en la curva característica (Collector current I_C vs. Collector-emitter voltaje V_{CE}), no se afecta mucho V_{CE} si se aumenta un poco la corriente I_C.

Se utilizan los elementos R40 y C9 como filtro pasa bajos, para obtener una señal analógica a la salida del circuito, ya que es un filtro RC su frecuencia de corte esta dada por la siguiente fórmula:

$$f_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C};$$

si se asume una frecuencia de corte de 1Hz y R40 = 100kΩ, se tiene que:

$$C9 = \frac{1}{f_C \cdot 2 \cdot \pi \cdot R40};$$

$$C9 = \frac{1}{1Hz \cdot 2 \cdot \pi \cdot 100k\Omega} = 1.5uF;$$

valor estándar C3 = 1uF.

2.2.5.2 Acondicionamiento de la señal proveniente de un elemento externo tipo contacto hacia el computador.

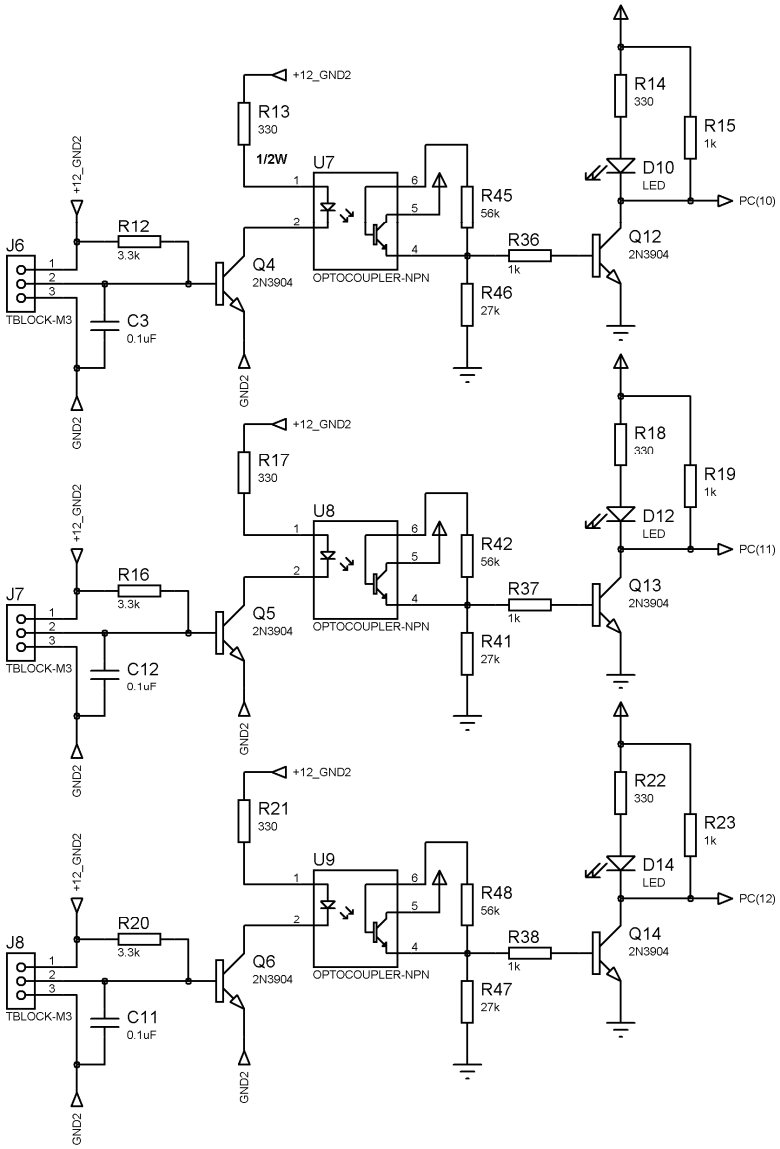


Figura 2.16 Circuito de acondicionamiento de ingreso de señales externas al computador

Los circuitos de la Figura 2.16, toman una señal tipo pulso o contacto de un elemento externo como un relé, interruptor, pulsador, interruptor inductivo, etc y la acondicionan para enviarlas al pórtico paralelo del computador, con la característica de aislamiento eléctrico a través de circuitos integrados opto acopladores.

De acuerdo a la curva característica del opto acoplador 4N25 (Forward current I_F vs. Forward voltaje V_F), se observa que para una corriente I_F de 30mA se tiene una caída de voltaje sobre el diodo de 1.25V, entonces:

$$R13 = \frac{V_{CC} - V_{F\,U7} - V_{CE\,SAT\,Q4}}{I_{F\,U7}};$$

$$R13 = \frac{12V - 1.25V - 0.2V}{30mA} = 352\Omega;$$

valor estándar, R13 = R17 = R21 = 330Ω.

$$P_{MAX\,R13} = I_{F\,U7}^2 \cdot R13;$$

$$P_{MAX\,R13} = (30mA)^2 \cdot 330\Omega = 297mW;$$

por lo que se seleccionan resistencias de ½ W;

R13 = R17 = R21 = 330Ω 1/2W.

Se selecciona al transistor 2N3904 como Q4, Q5, Q6, ya que soporta una corriente de colector de 100mA, además se requiere de una corriente en colector de 30mA, correspondiente a I_{R13}, por lo tanto:

$$R12 = \frac{V_{CC} - V_{BE\,SAT\,Q4}}{I_{B\,SAT\,Q4}};$$

$$R12 = \frac{12V - 0.7V}{\frac{I_{C\,Q4}}{\beta_{SAT}}};$$

$$R12 = \frac{11.3.V}{\frac{30mA}{10}} = 3.7k\Omega;$$

se selecciona un valor de resistencia menor para asegurar el estado de saturación, entonces:

R12 = R16 = R20 = 3.3kΩ

Se colocan capacitores (C3, C11, C12) de 0.1uF, para filtrar ruido de radio frecuencia.

Para el acondicionamiento de los indicadores LED, D10, D12, D14, se tiene que:

$I_{LED\ MIN}$ = 10mA y $V_{LED} \approx 2V$ [17], entonces:

$$R14 = \frac{V_{CC} - V_{D10} - V_{CE\ SAT\ Q12}}{I_{D10}};$$

$$R14 = \frac{5V - 2V - 0.2V}{10mA} = 280\Omega;$$

valor estándar, R14 = R18 = R22 = 330 Ω.

Se coloca resistencias (R15, R19, R23) de 1kΩ para asegurar el estado 1 lógico de ingreso hacia el computador.

Se selecciona al transistor 2N3904 como Q12, Q13, Q14, ya que maneja una corriente en colector de 100mA, además la corriente que circulará es de 15mA, valor correspondiente a la suma de corrientes de las resistencias R14 y R15.

Ya que el transistor Q12 maneja en el colector una corriente de 15mA, se tiene que:

$$I_{B\ Q12} = \frac{I_{C\ Q12}}{\beta_{SAT}};$$

$$I_{B\,Q12} = \frac{15mA}{10} = 1.5mA;$$

Además si se desea hacer circular una corriente por R36 de 0.2mA, la carga total del opto acoplador 4N25 sería 1.7mA; según la curva característica (Collector current I_C vs. Collector-emitter voltaje V_{CE}) con una corriente I_F de 30mA y una corriente I_C de 1.7mA, se tiene un voltaje V_{CE}, aproximado de 0.2V, entonces:

$$R46 = \frac{V_{CC} - V_{CE\,U7}}{I_{R46}};$$

$$R46 = \frac{5V - 0.2V}{0.2mA} = 24k\Omega;$$

valor estándar, R46 = R41 = R47 = 27kΩ.

$$R36 = \frac{V_{CC} - V_{CE\,U7} - V_{BE\,SAT\,Q12}}{I_{R36}};$$

$$R36 = \frac{5V - 0.2V - 0.7V}{1.7mA} = 2.4k\Omega;$$

valor estándar, R36 = R37 = R38 = 2.7kΩ;

Como se puede ver en la curva característica (Collector current I_C vs. Collector-emitter voltaje V_{CE}), no se afecta mucho V_{CE} si se disminuye un poco la corriente I_C.

Según la curva característica (Switching time vs. Base-emitter resistance) del opto acoplador 4N25, se tiene que los tiempos de conmutación más bajos se logran con una resistencia entre base y emisor, con un valor aproximado de 60kΩ, por lo que se asume R45 = R42 = R48 = 56kΩ.

Se emplea opto acopladores de propósito general 4N25 como U7, U8, U9, para aislar eléctricamente al computador de cualquier elemento externo.

2.2.5.3 Acondicionamiento de la señal proveniente del controlador del motor de pasos para manejar un relé a través de un circuito de retardo a la conexión.

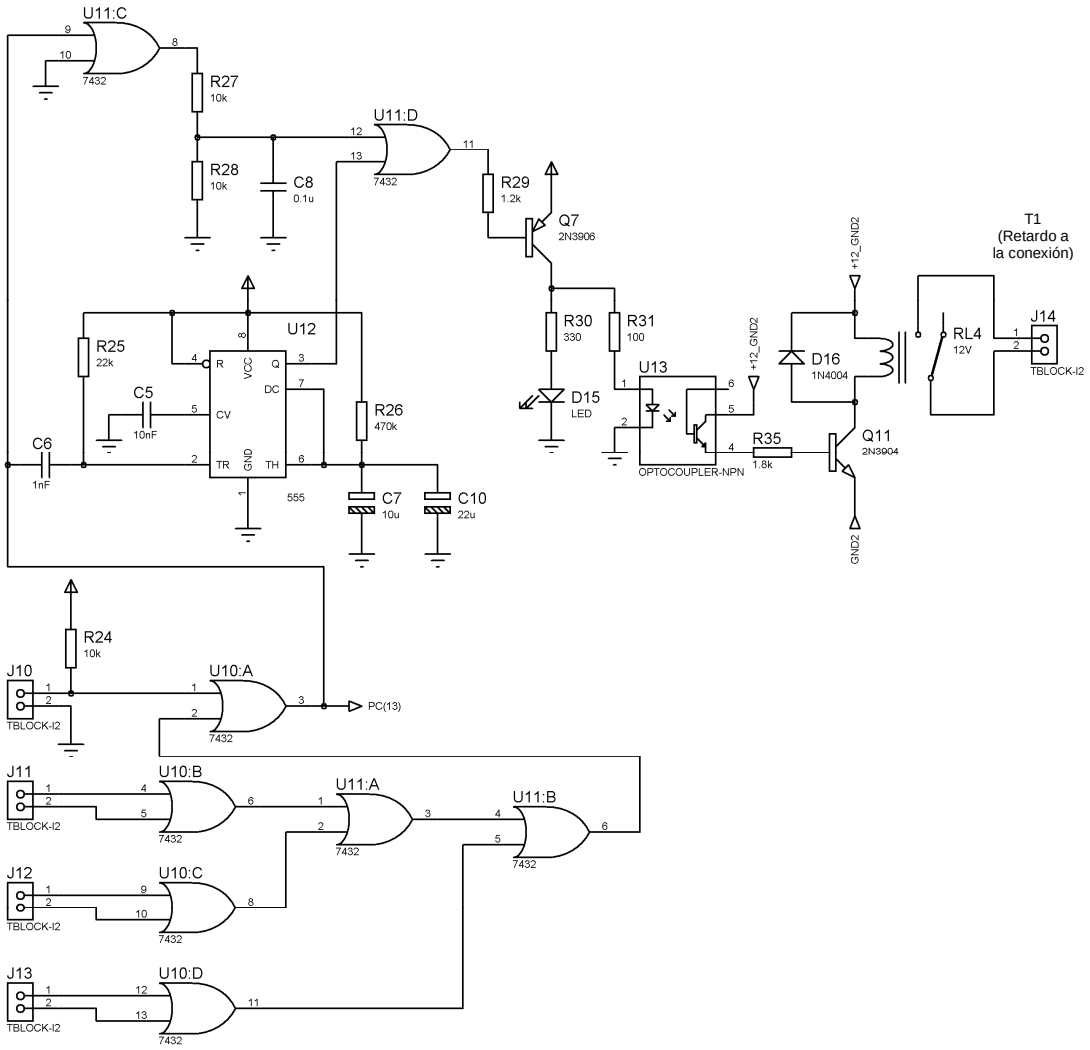


Figura 2.17 Circuito de acondicionamiento temporizado

El circuito de la Figura 2.17 tiene la función de proporcionar un retardo a la conexión del sistema después que se haya reseteado un error mediante el botón paro de emergencia externo, para ello se recibe señales digitales de 0 ó 5V provenientes de los controladores (J11, J12, J13) y una señal tipo contacto (J10) correspondiente a un interruptor normalmente cerrado (paro de emergencia), se acondiciona las señales y se utiliza un timer 555 para generar el retardo a la conexión, que a través de un circuito integrado opto acoplador y elementos de

acondicionamiento de corrientes, maneja un relé de 12V; si alguna de las señales digitales de entrada se encuentra en 1 lógico o el interruptor se abre, se desactiva inmediatamente RL4, si se resetea el estado de error, es decir al cambiar de estado 1L a 0L en el punto U10:A – 3, RL4 todavía se mantiene desactivado debido a los circuitos que sirven como retardo a la conexión (R27, R28, C8 y circuito monoestable con 555), pero RL4 se activa después del tiempo de retardo.

Se utiliza circuitos integrados 74LS32 como U10, U11, para obtener un 1L con cualquier entrada en estado 1L.

Se coloca una resistencia (R24) de 10kΩ, para asegurar el estado 1L en el punto U10:A – 1, cuando J10 permanece abierto.

Se emplea un circuito integrado 555 (U12) en configuración multivibrador monoestable para dar un retardo a la conexión en función al pulso de entrada; esta configuración responde a la ecuación:

$$T = 1.1 \cdot R \cdot C$$

Donde T es el tiempo del ancho del pulso, R = R26 y C = C7 + C10 (ya que se encuentran en paralelo); se ha visto conveniente un tiempo aproximado de 15 segundos para resetear el sistema, entonces:

$T = 1.1 \cdot R26 \cdot (C7+C10)$;

si se asume R26 = 470kΩ;

$$C7 + C10 = \frac{T}{1.1 \cdot R26};$$

$$C7 + C10 = \frac{15s}{1.1 \cdot 470k\Omega} = 29uF;$$

si se asume C7 = 10uF, entonces:

C10 = 29uF – C7;

C10 = 29uF – 10uF = 19uF;

valor estándar, C10 = 22uF.

El fabricante recomienda colocar un capacitor (C5) de 0.01uF para que el circuito integrado 555 funcione correctamente.

El circuito conformado por R25 y C6, sirve para obtener un pulso de corta duración de estado 0L, que será la señal de disparo para el circuito integrado 555; si se selecciona un valor de tiempo de 0.1ms para el pulso y se considera que el tiempo de carga de un capacitor es aproximadamente, $T \approx 5 \cdot R \cdot C$, se tiene que:

si se asume C6 = 1nF, entonces:

$$R25 = \frac{T}{5 \cdot C6};$$

$$R25 = \frac{0.1ms}{5 \cdot 1nF} = 20k\Omega;$$

valor estándar, R25 = 22kΩ.

El circuito conformado por los elementos R27, R28, C8, dan un pequeño retardo al cambio de estado 1L a 0L en U11:D – 12, para evitar un problema en la transición de 0L a 1L en la salida del IC 555; ya que el tiempo de descarga aproximado de un capacitor es $T \approx 5 \cdot R \cdot C$, se tiene que:

Asumiendo un valor de 2.5ms que es mucho mayor a 0.1ms del circuito conformado por R25 y C6, además se asume C8 = 0.1uF, entonces:

$$R27 \,||\, R28 = \frac{T}{5 \cdot C8};$$

$$R27 \,||\, R28 = \frac{2.5ms}{5 \cdot 0.1uF} = 5k\Omega;$$

si se asume R27 = R28, se tiene que:

$$R27 \,||\, R28 = \frac{R27 \cdot R28}{R27 + R28};$$

$$R27 \,||\, R28 = \frac{R27^2}{2 \cdot R27};$$

$$R27 = 2 \cdot (R27 \,||\, R28);$$

R27 = R28 = 10kΩ.

Se utiliza un relé de 12V con contactos NC, NA, COM, como RL4.

Se coloca un diodo (D16) 1N4004 en anti-paralelo para descargar la corriente almacenada por la bobina del relé cuando el transistor Q11 se encuentra en estado de corte.

Se selecciona al transistor 2N3904 como Q11, ya que se requiere manejar una corriente de colector de 50mA máximo y el transistor soporta hasta 100mA, por lo que la corriente de colector del opto acoplador 4N25 sería:

$$I_{C\,U13} = I_{B\,Q11};$$

$$I_{C\,U13} = \frac{I_{C\,Q11}}{\beta_{SAT}};$$

$$I_{C\,U13} = \frac{50mA}{10} = 5mA;$$

Según la curva característica (Collector current I_C vs. Collector-emitter voltaje V_{CE}) con una corriente I_F de 30mA y una corriente I_C de 5mA, se tiene un voltaje V_{CE}, aproximado de 0.2V, entonces:

$$R35 = \frac{V_{CC} - V_{CE\,U13} - V_{BE\,SAT\,Q11}}{I_{R35}};$$

$$R35 = \frac{12V - 0.2V - 0.7V}{5mA} = 2.2k\Omega;$$

para asegurar el estado de saturación se escoge una resistencia de menor valor, R35 = 1.8kΩ

Como se puede ver en la curva característica (Collector current I_C vs. Collector-emitter voltaje V_{CE}), no se afecta mucho V_{CE} si se aumenta un poco la corriente I_C.

Se utiliza un opto acoplador de propósito general (U13) 4N25 para aislar eléctricamente los circuitos controladores de los elementos externos.

De acuerdo a la curva característica del opto acoplador 4N25 (Forward current I_F vs. Forward voltaje V_F), se observa que para una corriente I_F de 30mA se tiene una caída de voltaje sobre el diodo de 1.25V, entonces:

$$R31 = \frac{V_{CC} - V_{F\,U13} - V_{CE\,SAT\,Q7}}{I_{F\,U13}};$$

$$R31 = \frac{5V - 1.25V - 0.2V}{30mA} = 118\Omega;$$

valor estándar, R31 = 100Ω.

Para el acondicionamiento del indicador LED (D15), se tiene que:

$I_{LED\,MIN}$ = 10mA y $V_{LED} \approx$ 2V [17], entonces:

$$R30 = \frac{V_{CC} - V_{D15} - V_{CE\,SAT\,Q7}}{I_{D15}};$$

$$R30 = \frac{5V - 2V - 0.2V}{10mA} = 280\Omega;$$

valor estándar, R30 = 330 Ω.

Ya que las resistencias R30 y R31 manejan en conjunto una corriente de 40mA, se emplea un transistor (Q7) 2N3904, el cual soporta una corriente de colector de 100mA, por lo tanto:

$$R29 = \frac{V_{CC} - V_{BE\,SAT\,Q7}}{\frac{I_{R30} + I_{R31}}{\beta_{SAT}}};$$

$$R29 = \frac{5V - 0.7V}{\frac{10mA + 30mA}{10}} = 1.1k\Omega;$$

valor estándar, R29 = 1.2kΩ.

2.2.5.4 Fuente de alimentación

El circuito ubicado en la parte superior de la Figura 2.18, regula el voltaje a 5V proveniente de la fuente de 12V de alimentación externa 1, el cual proporcionará energía eléctrica a los diferentes elementos del circuito interfaz 2 que requieren de 5V. Al sumar todas las corrientes máximas de los circuitos de baja potencia (5V) de INTERFAZ PC – ELEMENTOS EXTERNOS, se tiene una corriente aproximada de 250mA, por lo que se puede utilizar un regulador de voltaje (U3) 7805.

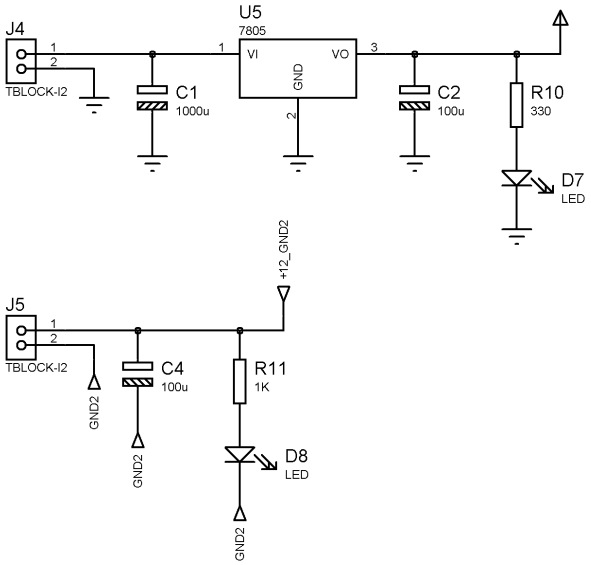


Figura 2.18 Fuente de alimentación

Se colocan capacitores (C2, C4) de 100uF, para dar mayor estabilidad al voltaje regulado, así como un capacitor (C1) de 1000uF, para cumplir el mismo propósito.

Para el acondicionamiento de los indicadores LED (D7, D8), se debe considerar que la corriente aproximada de trabajo del LED es 10mA, además su voltaje de funcionamiento es 2 V aproximadamente [17], entonces:

$$R10 = \frac{V_{R10}}{I_{R10}};$$

$$R10 = \frac{5V - 2V}{10mA} = 300\Omega;$$

valor estándar, R10 = 330Ω.

$$R11 = \frac{V_{R11}}{I_{R11}};$$

$$R11 = \frac{12V - 2V}{10mA} = 1k\Omega.$$

2.2.6 FUENTE PARA MOTORES PASO A PASO

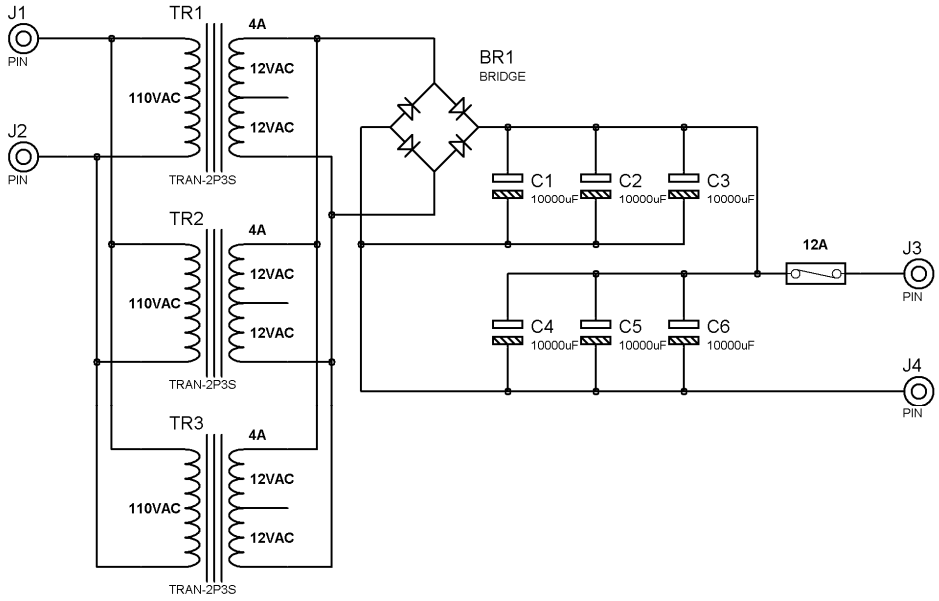


Figura 2.19 Fuente DC para motores paso a paso

La máquina fresadora CNC tiene 2 motores paso a paso, uno para el eje X y otro para el eje Y, ya que se ha escogido una corriente máxima de 6A por cada motor, se requiere de una fuente que proporcione dicha corriente, para ello se colocan 3 transformadores en paralelo de 4A / 24VAC en el devanado secundario, los que se pueden conseguir fácilmente en el mercado nacional, a continuación se rectifica la señal de voltaje sinusoidal a través de un puente rectificador de 15A, luego se filtra el voltaje mediante 6 capacitores de 10000uF para obtener un

rizado de voltaje muy bajo. Con esto se obtiene una fuente de voltaje DC de 34V 12A aproximadamente.

$$V_{OUT\ DC} = V_{IN\ AC} \cdot \sqrt{2}$$

$$V_{OUT\ DC} = 24V \cdot \sqrt{2} = 33.94V$$

Se utiliza un fusible se 12A para proteger los elementos de la fuente.

2.2.7 CONEXIÓN DE RELÉS DE CONTROL

A continuación se presentan varios diagramas de conexión de los relés de control utilizados para el funcionamiento del sistema CNC.

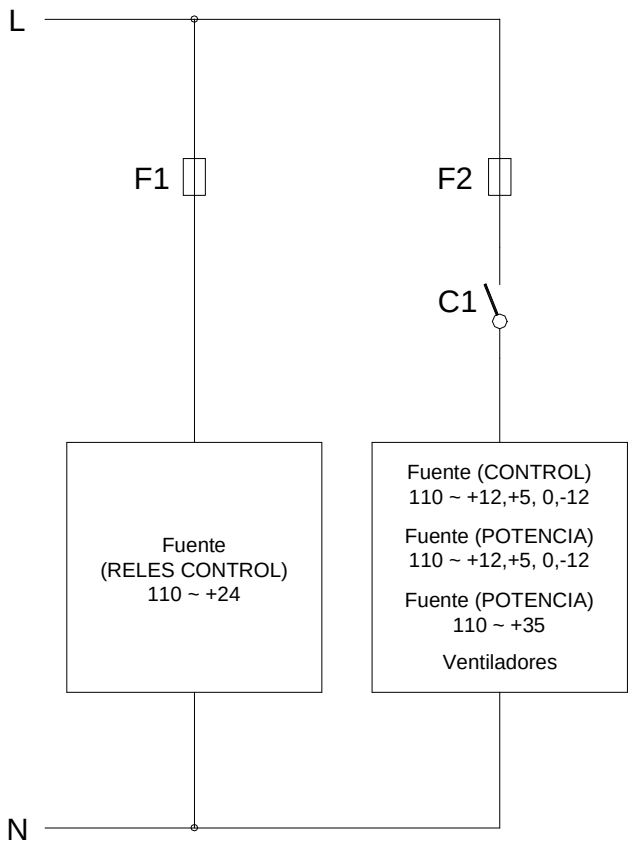


Figura 2.20 Conexión de equipos a través de mando a 110VAC

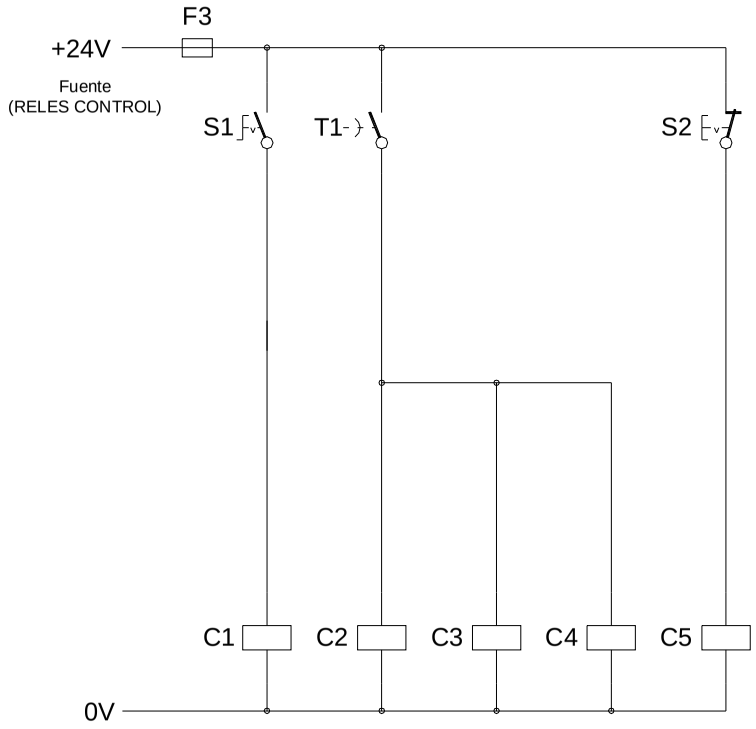


Figura 2.21 Mando a través de temporizador y manual para bobinas de control

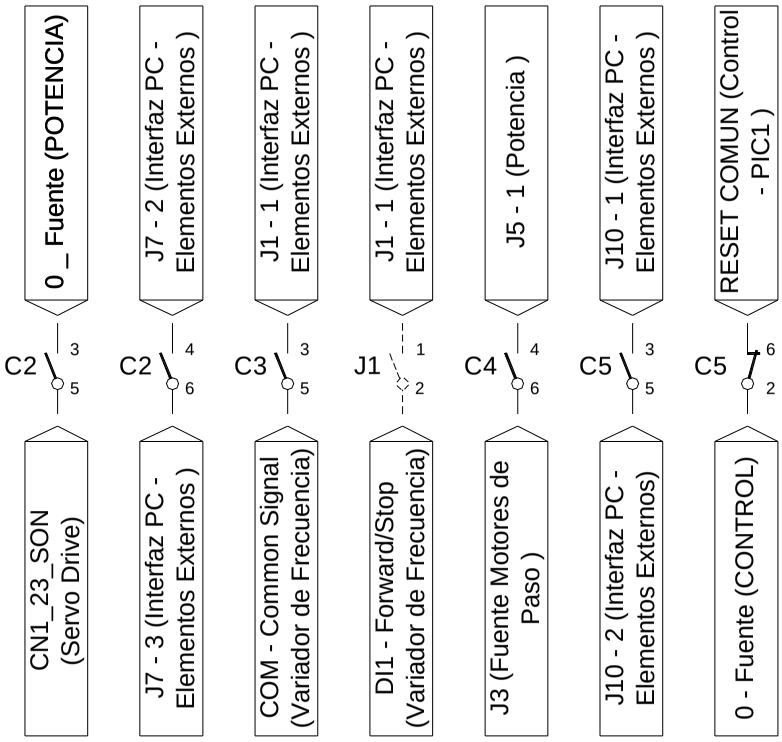


Figura 2.22 Conexión de contactos de relés

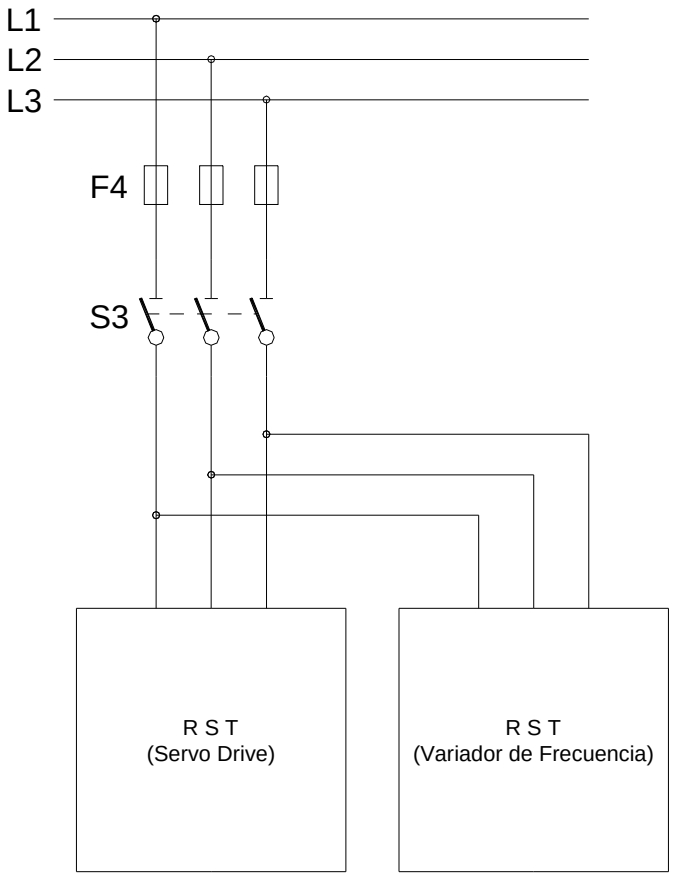


Figura 2.23 Conexión de equipos trifásicos a través de un mando manual

2.3 SISTEMA MECÁNICO

La estructura de la máquina fresadora fue diseñada y construida por la empresa TECHDESIGN, para realizar trabajos de mecanizado de piezas pequeñas, complejas y pequeñas series de piezas. La construcción de la máquina se realizó con materiales que se encuentran en el mercado local (planchas de tol, ejes, rodamientos, pernos, etc.), con mano de obra y maquinaria de la empresa TECHDESIGN.

A continuación se presenta una descripción de las partes constitutivas de la máquina fresadora:

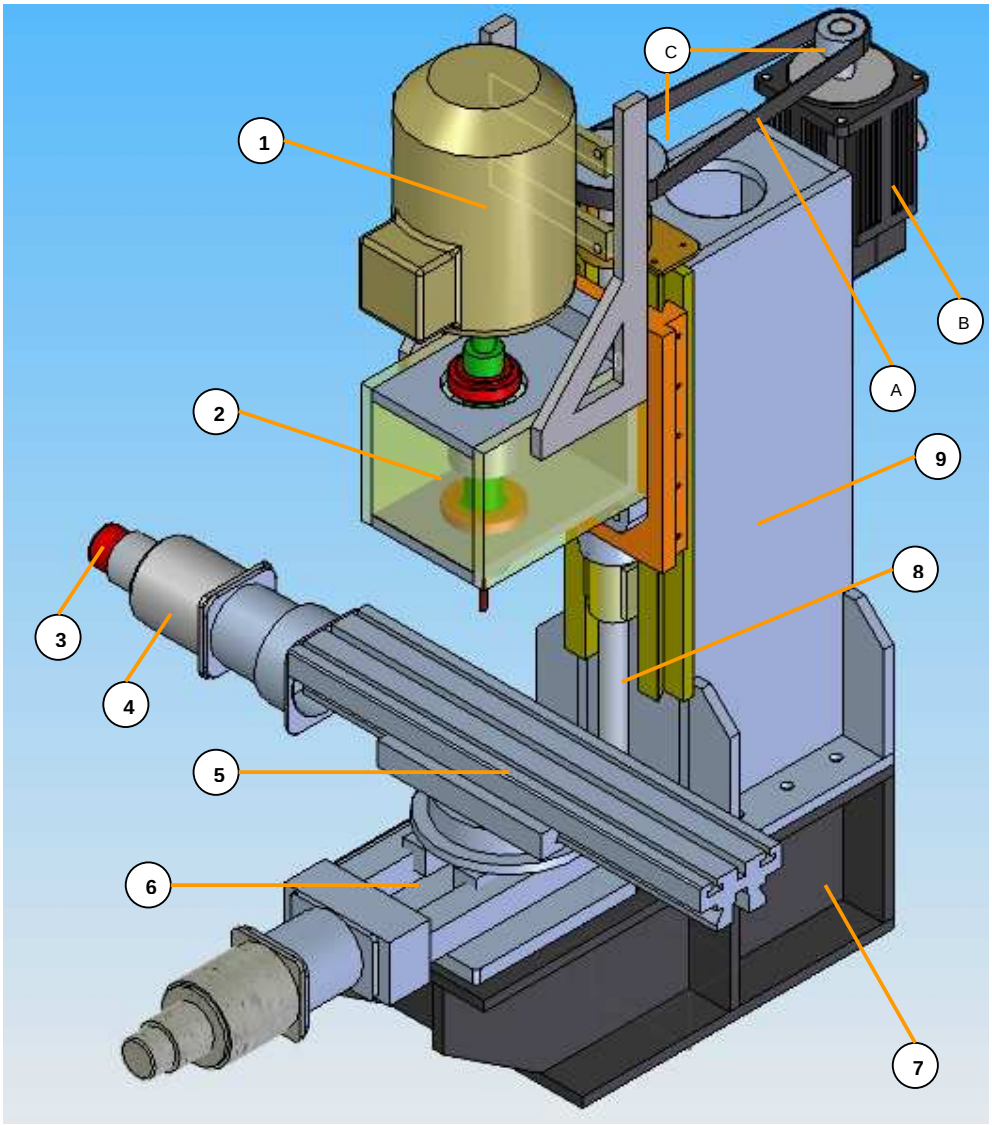


Figura 2.24 Conjunto mecánico

1. Motor de inducción.
2. Cabezal, compuesto por husillo principal, acople, rodamientos, porta herramientas, herramienta, soporte, pernos.
3. Encoder rotativo incremental.
4. Motor Paso a Paso.

5 Mesa X, compuesta de guías trapezoidales, tornillo, rodamientos, tuerca, separador de acople, pernos de sujeción, acople, prisioneros, tornillos allen.

6 Mesa Y, compuesta por elementos similares de mesa X.

7 Base, compuesta por pernos, placas, soportes, guías.

8 Tornillo de bolas, compuesta por tuerca de bolas, pernos, bases, rodamientos.

9 Estructura vertical, compuesta por pernos, soportes, placas.

A Banda sincrónica.

B Servo motor.

C Polea dentada.

2.4 CARACTERÍSTICAS DE EQUIPOS

Ya que el sistema necesita control de velocidad para el motor trifásico jaula de ardilla de mecanizado (Husillo principal), se utilizó un variador de velocidad marca EATON MVX9000.

Para el desplazamiento del eje Z se utilizó un servo motor trifásico ya que posee mejores características de torque y control que los motores de pasos utilizados para los ejes X, Y; por lo que su controlador es un servo drive marca GSK DA98D.

2.4.1 SERVO DRIVE GSK DA98D

En el manual del usuario se encuentran los circuitos recomendados para efectuar ya sea el control de velocidad o control de posición; como este proyecto de titulación se basa en control de posición, se presenta la configuración requerida:

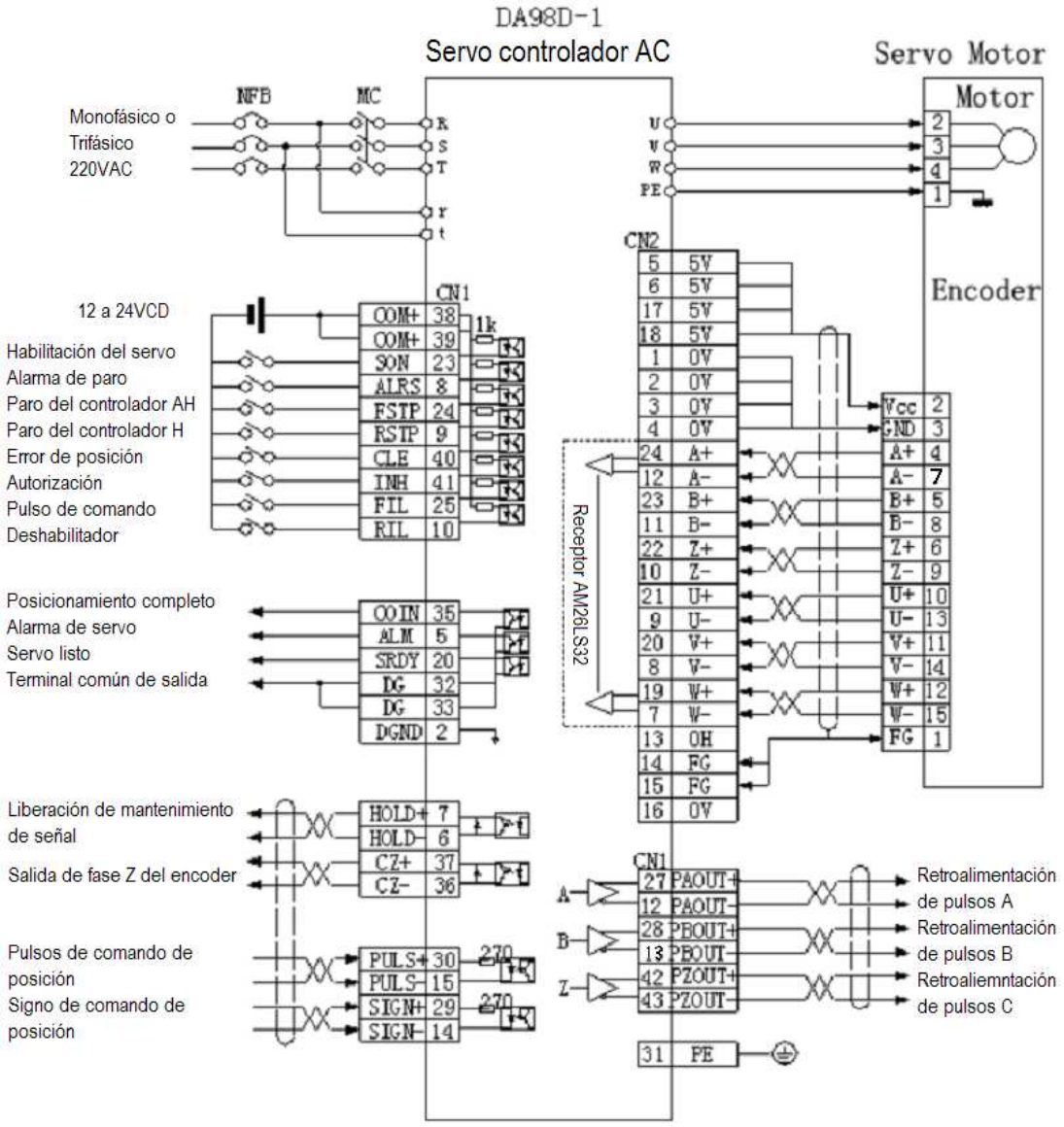


Figura 2.25 Diagrama de conexiones para servo drive GSK DA98D, tomado de [15]

Para el manejo de las entradas que comandan la posición (PULS+ [30], PULS- [15], SIGN+ [29], SIGN- [14]), el fabricante recomienda dos tipos de interfases; una de tipo diferencial con circuitos integrados AM26LS31 y MC3487 o una interfaz similar para RS422; otra de tipo unipolar para manejarse con elementos de conmutación como transistores, o salidas típicas de transistor de un PLC, por ejemplo, en el manual se encuentra información de valores recomendados para las resistencias dependiendo de la fuente externa que se escoja. Si se desea calcular el valor de la resistencia, se debe tener en cuenta que la corriente de

circulación por el diodo led interno debe estar entre 10 a 15mA; o sino se puede escoger uno de los valores que recomiendan, VCC=24V, R=1.3 ～ 2k; VCC=12V, R=510 ～820Ω; VCC=5V, R=82～120Ω.

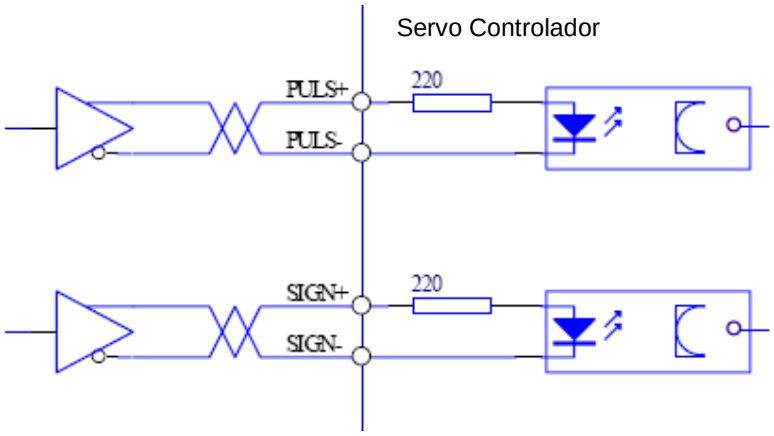


Figura 2.26 Manejo de las entradas Pulsos y Signo a través de drivers diferenciales, tomado de [15]

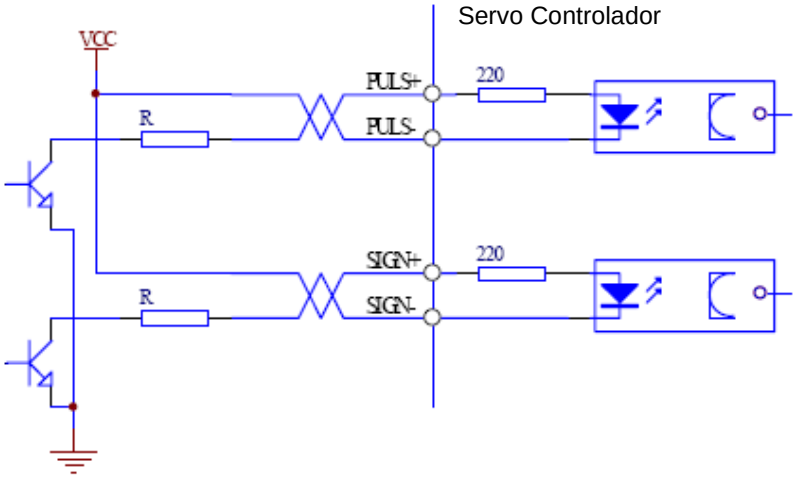
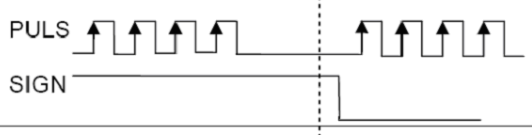
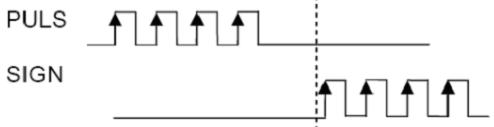


Figura 2.27 Manejo de las entradas Pulsos y Signo a través de transistores, tomado de [15]

Las señales que permiten comandar al servo drive deben ser del tipo tren de pulsos o dirección más pulsos como se muestra en la Tabla 2.3; estas señales pueden ser generadas por un computador, un controlador numérico, un plc, o cualquier dispositivo de control al que se lo pueda programar para obtener una cantidad de pulsos requerida a una determinada frecuencia.

Tabla 2.3 Formas de comando por pulsos, tomado de [15]

Formas de Comando por pulsos	Antihorario	Horario	Valores para configuración de parámetro
Símbolo / Tren de pulsos			0 Comando por pulsos + Símbolo
Tren de pulsos antihorario Tren de pulsos horario			1 Pulsos Antihorario / Pulsos Horario

El equipo se asemeja a un típico variador de frecuencia ya que presenta la posibilidad de ajustar sus parámetros en función de la aplicación, esto hace que el equipo más el servo motor se vuelvan flexibles ya que pueden ser útiles para cualquier aplicación dependiendo de la manipulación de parámetros; a continuación se presenta un listado de todos los parámetros configurables:

Tabla 2.4 Parámetros configurables de servo drive GSK DA98D, tomado de [15]

No.	Parámetro	Modo	Rango de parámetro	Valores de fábrica	Unidad
0	Contraseña	P,V	0~9999	315	
1	Código de modelo	P,V	0~569	30*	
2	Versión de programa (Solo lectura)	P,V	*	*	
3	Estado inicial del visualizador	P,V	0~20	0	
4	Opciones de modo de control	P,V	0~5	0	
5	Ganancia proporcional de velocidad	P,V	5~2000	100*	Hz
6	Constante de tiempo integral de velocidad	P,V	1~1000	20*	ms
7	Filtro de comando de torque	P,V	1~500	100	%
8	Filtro pasa bajo para inspección de velocidad	P,V	1~500	100	%
9	Ganancia proporcional de posición	P	1~1000	40	1/S
10	Ganancia de alimentación en adelanto de posición	P	0~100	0	%
11	Frecuencia de corte de filtro pasa bajo para alimentación en adelanto de posición	P	1~1200	300	Hz
12	Numerador de división de frecuencia de los pulsos de comando de posición	P	1~32767	1	
13	Denominador de división de frecuencia de los pulsos de comando de posición	P	1~32767	1	
14	Modo de pulsos de entrada de comando de posición	P	0~1	0	
15	Inversión de dirección de pulso de	P	0~1	0	

	comando de posición				
16	Rango para completar la posición	P	0~30000	20	Pulso
17	Rango de inspección para exceso de posición	P	0~30000	400	x100 Pulso
18	Error de exceso de posición no válido	P	0~1	0	
19	Filtro de suavizado de comando de posición	P	0~30000	0	0.1 ms
20	Entrada de paro del controlador no válida	P,V	0~1	0	
21	Velocidad de operación JOG	V	-3000~3000	120	r/min
22	Reservado				
23	Límite de velocidad máxima	P,V	0~4000	3600	r/min
24	Velocidad interna 1	V	-3000~3000	0	r/min
25	Velocidad interna 2	V	-3000~3000	100	r/min
26	Velocidad interna 3	V	-3000~3000	300	r/min
27	Velocidad interna 4	V	-3000~3000	-100	r/min
28	Completar velocidad	V	0~3000	500	r/min
29	Reservado				
30	Numerador de conversión de velocidad lineal	P,V	1~32767	10	
31	Denominador de conversión de velocidad lineal	P,V	1~32767	1	
32	Posición decimal de velocidad lineal	P,V	0~5	3	
33	Alcance de velocidad cero para comando analógico	V	0~1000	3	
34	Límite de torque antihorario interno	P,V	0~300	300*	%
35	Límite de torque horario interno	P,V	-300~0	-300*	%
36	Límite de torque antihorario externo	P,V	0~300	100	%
37	Límite de torque horario externo	P,V	-300~0	-100	%
38	Límite de torque para operación de prueba de velocidad y operación JOG	V	0~300	100	%
39	Constante de tiempo de aceleración	V	1~10000	0	ms
40	Constante de tiempo de desaceleración	V	1~10000	0	ms
41	Numerador de relación de transmisión electrónica de salida	V	1~255	1	
42	Denominador de relación de transmisión electrónica de salida	V	1~255	1	
43	Opciones de comando de velocidad	V	0~1	1	
44	Punto cero AD de alta velocidad	V	412~1600	1024	
45	Punto cero AD de baja velocidad	V	412~1600	1024	
46	Control de dirección de rotación del motor	V	0~3	0	
47	Ganancia de comando analógico	V	20~3000	100	
48	Alcance de no bloqueo para comando analógico	V	0~1000		
49	Opciones de canales de ajuste cero para velocidad analógica	V	0~1	0	
52	Modo de transición de comando analógico	V	0~1	0	
53	Punto cero de deslizamiento	V	0~1023	0	

Para el control de posición se utilizan todos los parámetros que tengan P en la columna de modo; para este proyecto se empleo los parámetros que vienen de fábrica y solo se modifico los mencionados a continuación:

Parámetro No. 3 – Estado inicial del visualizador (Initial Display State) = 3

La opción 3 de este parámetro permite visualizar siempre el valor de los pulsos de ingreso hacia el servo controlador, es decir los pulsos que envía el computador.

Se tiene 20 opciones para escoger y como se puede ver, hay la posibilidad de mostrar la corriente del motor, torque en el eje, velocidad de rotación, códigos de alarma, señal de entrada del encoder, etc.

Tabla 2.5 Parámetro No. 3, tomado de [15]

No.	Parámetro	Funciones	Rango
3	Estado inicial del visualizador	Seleccione los estados de visualización de la pantalla de controlador después de ser energizado. 0: Muestra velocidad de rotación del motor; 1: Muestra que la posición actual es menor por 5 pulsos; 2: Muestra que la posición actual es mayor por 5 pulsos; 3: Muestra que el comando de posición actual (valor de pulsos acumulados) es menor por 5; 4: Muestra que el comando de posición actual (valor de pulsos acumulados) es mayor por 5; 5: Muestra que el error de posición es menor por 5; 6: Muestra que el error de posición es mayor por 5; 7: Muestra torque del motor; 8: Muestra corriente del motor; 9: Muestra velocidad lineal; 10: Muestra modo de control; 11: Muestra frecuencia de pulsos de comando de posición; 12: Muestra comando de velocidad; 13: Muestra comando de torque; 14: Muestra posición absoluta del rotor durante una vuelta; 15: Muestra estado de los terminales de entrada; 16: Muestra estado de los terminales de salida; 17: Muestra señales de entrada de encoder; 18: Muestra estado de operación; 19: Muestra código de alarma; 20: Reservado.	0~20

Parámetro No. 12 – Numerador de división de frecuencia de los pulsos de comando de posición (Position command pulse frequency division numerator) = 200

Tabla 2.6 Parámetro No. 12, tomado de [15]

No.	Parámetro	Funciones	Rango
12	Numerador de división de frecuencia de pulsos de comando de posición	Configure la división de frecuencia de los pulsos de comando (transmisión electrónica). Bajo el modo de control de posición, se puede ajustar los parámetros PA12 y PA13 para obtener un control ideal en cuanto a ángulo de giro/pulso requerido por el usuario. P x G = N x C x 4 P: Número de pulsos de comando de entrada G: Relación de transmisión electrónica $G = \frac{\text{Numerador de división de frecuencia}}{\text{Denominador de división de frecuencia}}$ N: Vueltas de rotación del motor C: Número de pulsos del encoder fotoeléctrico. En este sistema C = 2500 [Ejemplo] Si los pulsos de comando de entrada son 6000, y el servo motor gira una vuelta: $G = \frac{N \times C \times 4}{P} = \frac{1 \times 2500 \times 4}{6000} = \frac{5}{3}$ entonces el parámetro PA12 es 5 y PA13 es 3 El rango recomendado de la relación de transmisión electrónica es: $\frac{1}{50} \leq G \leq 50$	1~32767

Con el parámetro 12 y 13 se ajusta la relación de transmisión para obtener el desplazamiento lineal requerido por la máquina en función de la cantidad de pulsos por milímetro que envía el computador.

Parámetro No. 13 – Denominador de división de frecuencia de los pulsos de comando de posición (Position command pulse frequency division denominator) = 191

Tabla 2.7 Parámetro No. 13, tomado de [15]

No.	Parámetro	Funciones	Rango
13	Denominador de división de frecuencia de pulsos de comando de posición	Referirse al parámetro PA12	1~32767

Parámetro No. 16 – Rango para completar la posición (Range for positioning completing) = 0

Con el parámetro 16 se ajusta la cantidad de pulsos que se desea tener como error, es decir que el controlador detiene al motor sin completar todos los pulsos de comando enviados por el dispositivo externo.

Tabla 2.8 Parámetro No. 16, tomado de [15]

No.	Parámetro	Funciones	Rango
16	Rango para completar posición	Configure el rango de pulsos para completar posición bajo el modo de control de posición. Cuando el número de pulsos restante en el medidor de error de posición es menor o igual que el valor del parámetro, el controlador es obligado a completar la posición con la señal COIN ON de completar posición. Caso contrario será COIN OFF	0~30000 pulsos

Parámetro No. 17 – Rango de inspección para exceso de posición (Inspection range for position excess) = 200

Tabla 2.9 Parámetro No. 17, tomado de [15]

No.	Parámetro	Funciones	Rango
17	Rango de inspección para exceso de posición	Configure el rango de inspección para alarma de exceso de posición. Bajo el modo de control de posición, la alarma de exceso de posición se activará en el controlador cuando el valor del medidor de error de posición exceda el valor de este parámetro.	0~30000 x100 pulsos

Con el parámetro 17 se ajusta la cantidad de pulsos que acepta el controlador como error de posición a tiempo real, es decir que si excede este valor en cualquier instante el drive muestra un mensaje de error y deshabilita al motor.

Parámetro No. 20 – Entrada de paro no válida para el driver (Invalid drive stopping input) = 1

El parámetro 20 se utiliza con una entrada de interruptor del servo drive si se desea un paro de emergencia por ejemplo; en el caso de este proyecto no se lo utiliza.

Tabla 2.10 Parámetro No. 20, tomado de [15]

No.	Parámetro	Funciones	Rango
20	Entrada de paro no válida para el driver	Configure como 0: Paro del controlador en sentido de giro horario y antihorario válido. 1: Paro del controlador en sentido de giro horario y antihorario no válido.	0~1

Como este equipo integra elementos de alta tecnología, automáticamente se protege deshabilitando la alimentación de energía hacia el motor y cualquier motivo de fallo se presenta como una señal de error, dentro de los cuales se tiene:

Tabla 2.11 Listado de alarmas, tomado de [15]

Códigos de alarma	Nombre de alarma	Descripción
0	Normal	
1	Velocidad excesiva	Velocidad del servo motor excede el valor configurado
2	Sobrevoltaje en circuito principal	Voltaje de alimentación del circuito principal excesivo
3	Disminución de voltaje en circuito principal	Voltaje de alimentación del circuito principal muy bajo
4	Exceso de posición	Valor en el medidor de error de posición sobrepasa el valor configurado
5	Sobrecalentamiento del motor	Temperatura excesiva en el motor
6	Fallo de saturación del regulador de velocidad	Saturación de tiempo extendido del regulador de velocidad
7	Paro anormal del controlador	Ambas entradas de paro del controlador están apagadas
8	Desbordamiento del medidor de error de posición	Valor absoluto del número en el medidor de error de posición supera 2^{30}
9	Fallo de encoder	Error en la señal del encoder
10	Disminución de voltaje en la alimentación de control	La alimentación de control de ±15V es baja
11	Fallo de módulo IPM	Avería del módulo inteligente IPM
12	Corriente excesiva	Corriente del motor excesiva
13	Sobrecarga	Sobrecarga en controlador y motor (sobrecalentamiento instantáneo)
14	Fallo de freno	Fallo en circuito de freno
15	Error de conteo de encoder	Conteo anormal en encoder
20	Error de memoria EEPROM	Error de memoria EEPROM

30	Pérdida de pulso Z en encoder	Pulso Z incorrecto en encoder
31	Error de señales UVW en encoder	Las señales UVW del encoder son incorrectas o no se acoplan con encoder
32	Violación de código de la señal UVW del encoder	Existe solo niveles bajos en señales UVW

En el manual de usuario del servo controlador GSK DA98D [15], se puede encontrar el listado más detallado con los posibles motivos de fallo y algunas sugerencias para manejar estas condiciones.

Para acceder a los parámetros y configuración del servo drive se tiene una interfaz compuesta por un display de 6 dígitos y 4 botones para desplazamiento de menús, aceptación de parámetros, etc.

Figura 2.28 Interfaz de usuario de servo controlador GSK DA98D, tomado de [15]

Con las teclas se desplaza por los menús, si se desea ingresar a cualquiera de ellos se presiona la tecla . Para regresar al menú principal se presiona el botón .

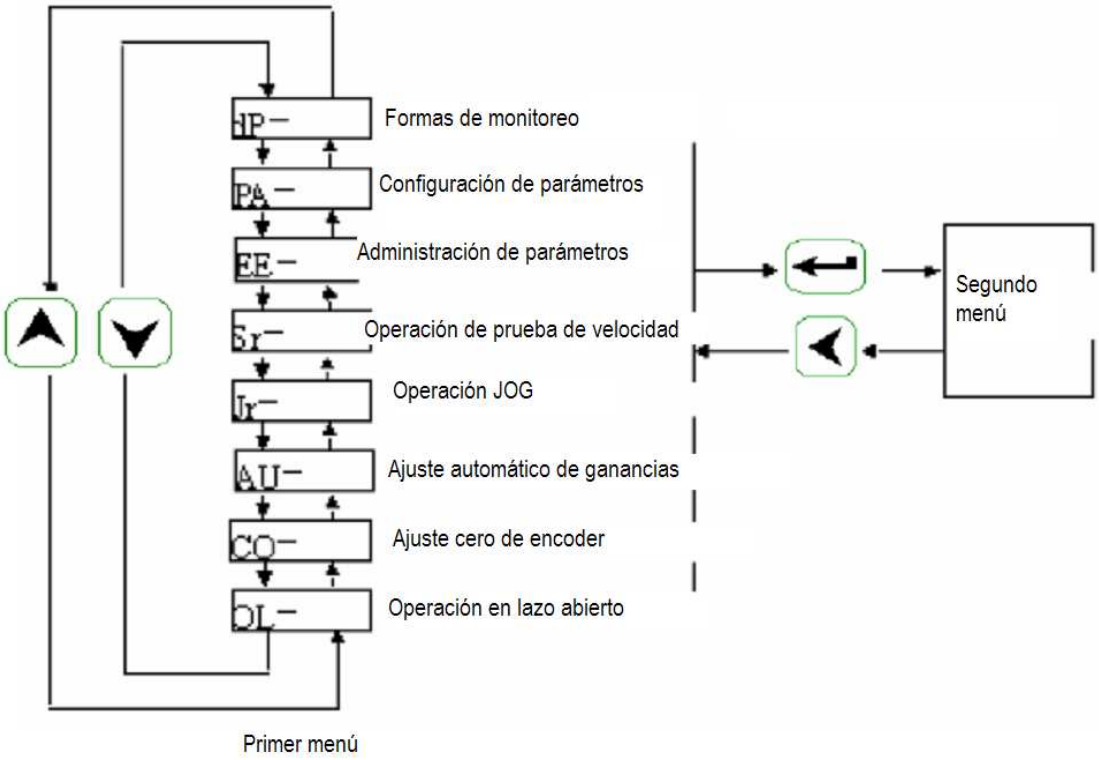


Figura 2.29 Opciones de menú principal, tomado de [15]

Para modificar alguno de los parámetros de la lista se ingresa a la opción “PA” con el botón ↵, y en ella desplazarse con las teclas ▲ ▼ para hallar el parámetro requerido, para modificarlo se presiona el botón ↵, modificando el valor con las teclas ▲ ▼, para aceptarlo se presiona ↵, y para regresar de menú se presiona el botón ◄.

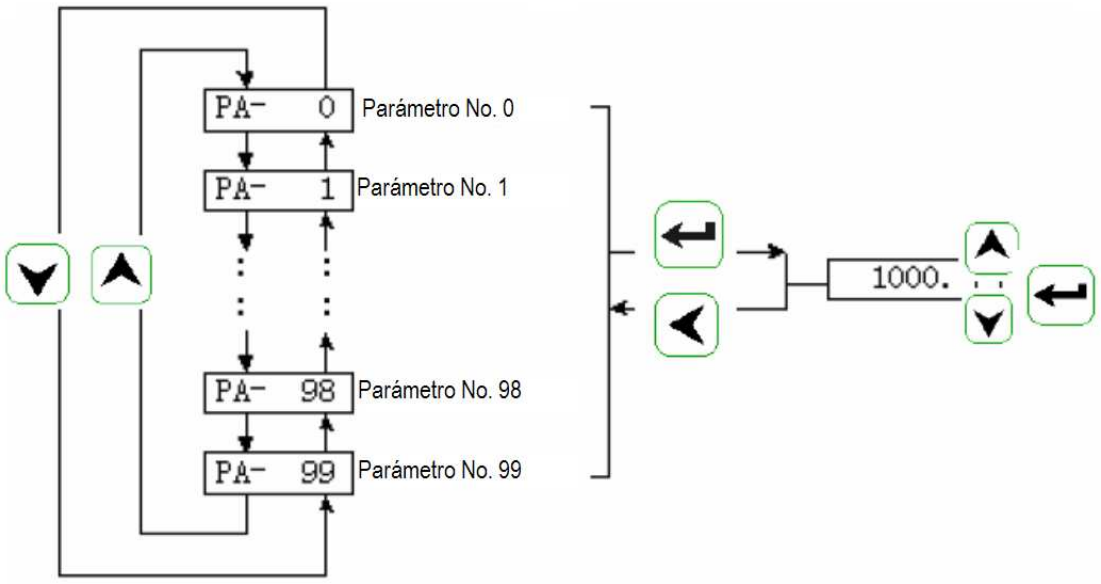


Figura 2.30 Opciones de menú PA, tomado de [15]

Como se puede apreciar el manejo y ajuste de parámetros del servo drive es muy sencillo lo que ayuda al usuario final a sacar el mejor provecho del equipo.

2.4.2 VARIADOR DE FRECUENCIA EATON MVX9000

Se utilizó un variador de frecuencia para controlar la velocidad del motor de inducción del husillo principal, para ello se implementó un circuito interfaz que maneje la entrada analógica del mismo, proporcionando de esta manera la señal de referencia de velocidad.

A continuación se muestra el diagrama de conexiones para cualquiera de las configuraciones que acepta el equipo:

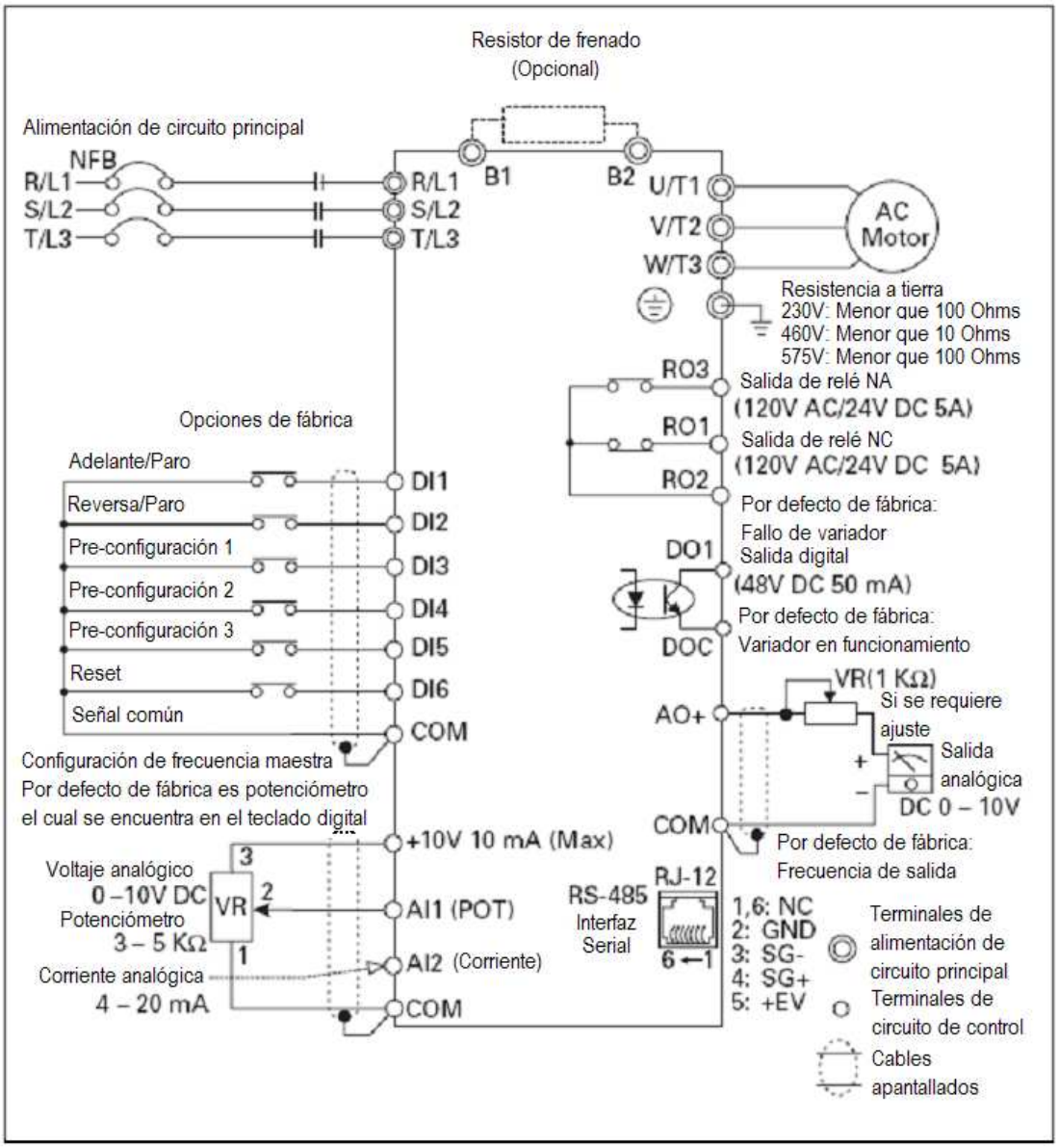


Figura 2.31 Diagrama de conexión para variador de frecuencia EATON MVX9000, tomado de [18]

Para editar los parámetros del variador de frecuencia, se utiliza una interfaz compuesta por indicadores tipo LED, un potenciómetro, botones direccionales arriba / +, abajo / -, izquierda, derecha, un display de 4 dígitos, y tres botones START, STOP / RESET, ENTER. En la Figura 2.32 se muestra la disposición de estos elementos.

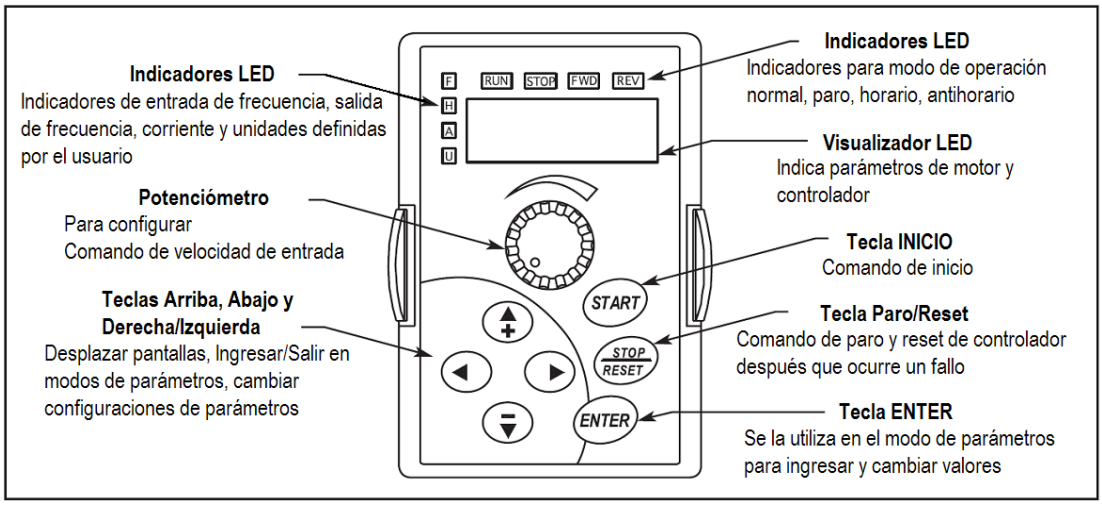


Figura 2.32 Partes constitutivas de interfaz de usuario de variador de frecuencia, tomado de [18]

Si se desea cambiar alguno de los parámetros, presionar el botón derecha, luego con los botones arriba y abajo, se desplaza la lista de menús hasta encontrar la opción que se necesita

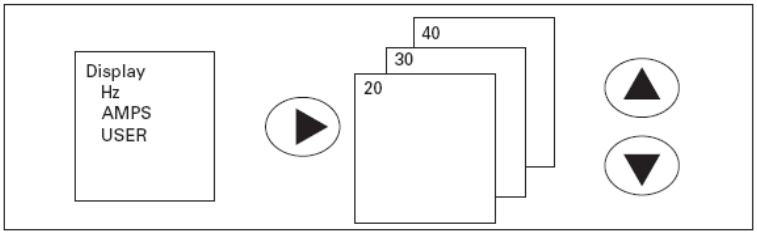


Figura 2.33 Manera para cambiar de menús, tomado de [18]

Una vez encontrado el menú presionar el botón derecha y con las teclas arriba y abajo, buscar el parámetro específico

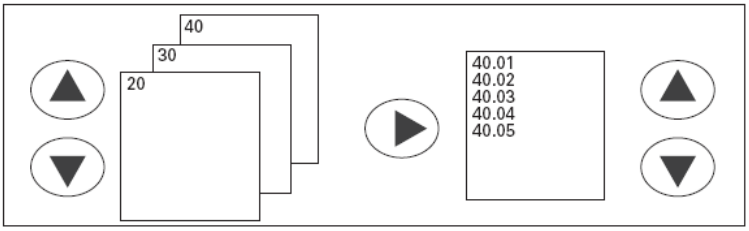


Figura 2.34 Manera para ingresar a los parámetros, tomado de [18]

Para acceder al valor del parámetro presionar la tecla derecha, como se muestra en la Figura 2.35

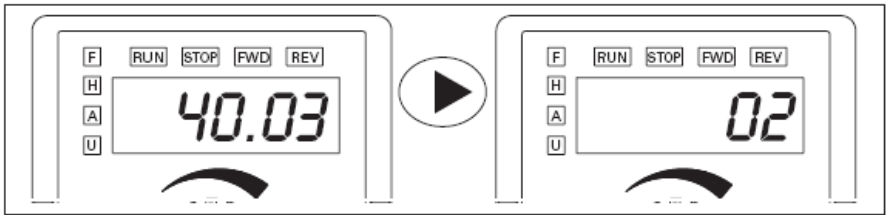


Figura 2.35 Cambio de valor de parámetro, tomado de [18]

Luego para modificar su valor presionar la tecla ENTER y con las flechas arriba, abajo o el potenciómetro, cambiar de valor, en el estado actual el display se muestra intermitente, para aceptar el valor nuevo se presiona la tecla ENTER

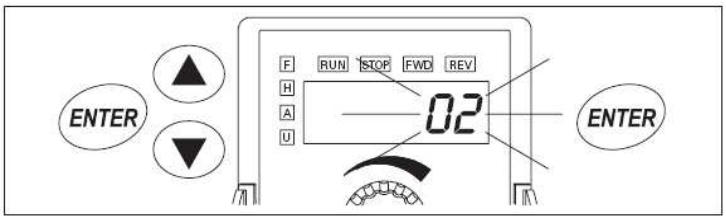


Figura 2.36 Cambio de valor de parámetro, tomado de [18]

Si el valor esta dentro del rango aceptable la pantalla muestra el mensaje End, caso contrario muestra el mensaje Err, este indica que por algún motivo no se puede modificar el parámetro

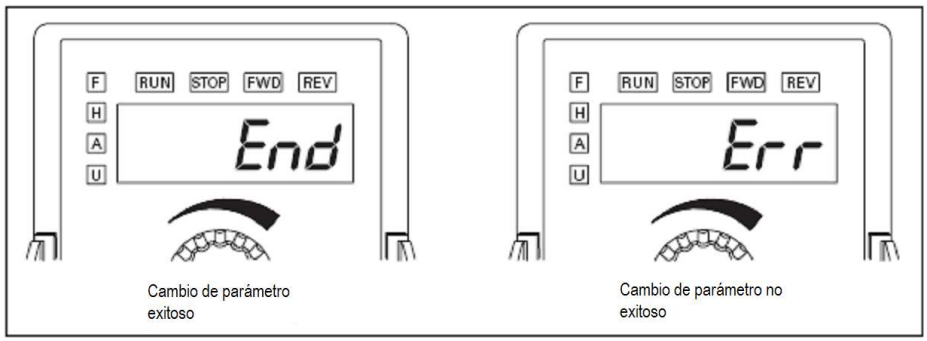


Figura 2.37 Mensaje de finalización o error después de un cambio de valor de parámetro, tomado de [18]

Los parámetros que se utilizaron para la implementación del variador de frecuencia en este proyecto son los que se mencionan a continuación:

Parámetro 20.02 y 50.06 – Voltaje de placa del motor = 220, esto quiere decir que el voltaje de alimentación del variador de frecuencia es de 220VAC.

Parámetro 20.03 y 50.01 – Fuente de frecuencia maestra = 02, con la opción 02 se determina la frecuencia maestra por una señal de entrada de 0 a +10VDC en los terminales AI.

Parámetro 20.06 y 50.09 – Frecuencia de salida mínima = 0.0, con este valor se obtiene una frecuencia de salida mínima igual a 0 Hz.

Parámetro 20.07 y 50.04 – Frecuencia de salida máxima = 87.0, con este valor se obtiene una frecuencia de salida máxima igual a 87 Hz, correspondiente a 2500 rpm (aproximadamente) ya que el motor es de 1725 rpm a 60 Hz.

Parámetro 20.08 y 50.12 – Tiempo de aceleración = 5.0, con este valor se obtiene un tiempo de aceleración igual a 5 segundos, tiempo suficiente para arrancar el motor y evitar sobrecorrientes.

Parámetro 20.09 y 50.13 – Tiempo de desaceleración = 5.0, con este valor se obtiene un tiempo de desaceleración igual a 5 segundos, tiempo adecuado para detener al motor después del proceso de mecanizado.

Parámetro 30.03 – Invertir señal de referencia = 01, con esta opción se invierte los niveles de voltaje para la señal de entrada de referencia, debido a que la señal proporcionada por el circuito interfaz que controla al variador esta invertida; con esto se asegura correspondencia de valores de velocidad entre el programa de control (Mach3Mill) y el motor.

Parámetro 30.11 – Terminal de entrada digital = 01, con esta opción se configura a la entrada DI1 como señal de comando Adelante/Paro.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE PROGRAMA DE CONTROL

3.1 PROGRAMA PARA LOS MICROCONTROLADORES PIC

3.1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Se utilizaron dos microcontroladores PIC por cada dispositivo controlador de motor paso a paso, consecuentemente se escribieron dos programas diferentes, un programa para realizar el control en si, es decir el que esta encargado de recibir las señales del computador y del encoder y realizar el procesamiento para enviar parte de las señales de control a la etapa de potencia, el programa número dos abarca la visualización de la medición en milímetros del desplazamiento en el eje a controlar, además está encargado de realizar el control de corriente para limitarla en cierto valor de set point, enviando esta última señal de control también a la etapa de potencia.

Entre los dos programas se utilizó un protocolo de comunicación unidireccional no estándar para enviar los datos del microcontrolador PIC que realiza el control de posición, al microcontrolador PIC que realiza la visualización y control de corriente, estos datos son: contador de posición PC 16 bits, contador de posición ENCODER 16 bits y error de posición 17 bits.

3.1.2 DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CONTROL DE POSICIÓN

Este programa se escribió en lenguaje ensamblador ya que posee la característica de utilizar el menor número de instrucciones por ciclo de programa, optimizando de esta manera la respuesta del sistema. Se utilizó el microcontrolador PIC 16F877A y su programación fue realizada con la herramienta de desarrollo MPLAB de Microchip.

3.1.2.1 Configuración

Se empieza configurando los puertos de entrada/salida; para el pórtico A, se debe seguir la secuencia recomendada por el fabricante para configurarlas como entradas/salidas digitales; el sistema requiere 4 salidas de control para el motor de pasos, de las que se ha escogido RA0 a RA3.

Se configura el pórtico B, para que todas sus entradas sean digitales, de las cuales se utiliza RB0 como habilitación de controlador y RB4 a RB7 como dir/puls PC y A/B encoder, por recomendación del fabricante cualquier pin de entrada/salida que no se utilice se debe configurar como entrada.

Para el pórtico C, se configura al pin RC6 como salida de transmisión de datos; para el pórtico D, se configura al pin RD0 como salida, el cual representa un indicador de error de posición.

Antes de continuar con la configuración de los demás periféricos del microcontrolador, se escriben los valores iniciales necesarios para que el sistema funcione correctamente.

Luego se habilita las interrupciones global, por periféricos, por desbordamiento del timer 0 y por cambio de estado en los 4 bits más significativos del pórtico B; además de limpiar las banderas de interrupción.

Se continúa con la configuración del timer 1 y el módulo de comparación y captura del microcontrolador, para obtener una base de tiempo aproximada de 0.4 ms equivalente a una frecuencia de 2.5kHz utilizando un cristal de cuarzo de 20MHz, que servirá para generar micro pasos; para ello se habilita las interrupciones por igualdad en comparación y por desbordamiento del timer 1, además se requiere resetear el módulo de comparación y captura.

Después se configura el periférico de comunicación serial para obtener una comunicación asincrónica unidireccional a 9600 baudios sin bit de paridad.

Por último se configura al timer 0, con un valor de pre-escala 1:256, para obtener una base de tiempo aproximada de 13,1 ms la cual se utiliza para enviar los paquetes de datos en forma periódica.

3.1.2.2 Programa principal

Se empieza con una comparación al valor de error de posición, si es muy alto se activa la salida indicadora de error de posición y posteriormente el sistema deshabilitará las salidas de control del motor de pasos; luego se efectúa otra comparación para limitar el registro menos significativo del error de posición que está asociado a tablas, con el valor 254 para evitar problemas de salto indebido a direcciones de programa; después se genera un retardo correspondiente a la siguiente fórmula:

> Retardo = A(3 + (3 (B) + 1)) + 1;
> donde, A y B son registros de propósito general y Retardo se encuentra en ciclos de programa.

Este retardo, en conjunto con los valores de las tablas, genera un rango de frecuencia en el cual va a trabajar el motor de pasos; el rango de velocidad aproximado en el eje del motor es de 0 a 133 RPM, en vacío.

Se realizan dos comparaciones, una con un registro interno modificado o no en la primera comparación del programa principal y otra con la entrada de habilitación del controlador ubicada en el pórtico B, para efectuar o no un paro de emergencia del controlador al deshabilitar las señales de control del pórtico A.

A continuación, el programa principal en conjunto con las subrutinas “Subrutina pwm” y las de interrupción “Interrupción timer 1”, “Interrupción compare module” se encargan de generar todos los estados posibles mostrados en la Tabla 3.1

para micro pasos, medios pasos, pasos enteros, que permitirán controlar al motor de pasos.

Tabla 3.1 Estados para control de motor de pasos

PUNTERO	RA3	RA2	RA1	RA0	PASO
0	1	0	0	0	1
1	1	PWM = 20%	0	0	2
2	1	PWM = 40%	0	0	3
3	1	PWM = 60%	0	0	4
4	1	PWM = 80%	0	0	5
5	1	1	0	0	6
6	PWM = 80%	1	0	0	7
7	PWM = 60%	1	0	0	8
8	PWM = 40%	1	0	0	9
9	PWM = 20%	1	0	0	10
10	0	1	0	0	11
11	0	1	PWM = 20%	0	12
12	0	1	PWM = 40%	0	13
13	0	1	PWM = 60%	0	14
14	0	1	PWM = 80%	0	15
15	0	1	1	0	16
16	0	PWM = 80%	1	0	17
17	0	PWM = 60%	1	0	18
18	0	PWM = 40%	1	0	19
19	0	PWM = 20%	1	0	20
20	0	0	1	0	21
21	0	0	1	PWM = 20%	22
22	0	0	1	PWM = 40%	23
23	0	0	1	PWM = 60%	24
24	0	0	1	PWM = 80%	25
25	0	0	1	1	26
26	0	0	PWM = 80%	1	27
27	0	0	PWM = 60%	1	28
28	0	0	PWM = 40%	1	29
29	0	0	PWM = 20%	1	30
30	0	0	0	1	31
31	PWM = 20%	0	0	1	32
32	PWM = 40%	0	0	1	33
33	PWM = 60%	0	0	1	34
34	PWM = 80%	0	0	1	35
35	1	0	0	1	36
36	1	0	0	PWM = 80%	37
37	1	0	0	PWM = 60%	38
38	1	0	0	PWM = 40%	39
39	1	0	0	PWM = 20%	40
0	1	0	0	0	1

Para los estados de medios pasos y pasos completos, se asigna un valor binario al pórtico A, dependiendo del valor del puntero; en cambio para los estados de micro pasos, se emplea el timer 1 para generar una base de tiempo de 0.4ms, y con el módulo de comparación y captura se genera la relación de trabajo correspondiente, en función al puntero, como se puede observar en la Tabla 3.1.

El procedimiento para generar los estados es el siguiente; se realiza una comparación con el puntero mencionado en la Tabla 3.1, el cual puede tomar valores desde 0 a 39, para seleccionar el estado correspondiente.

Si el valor del puntero es 0, se deshabilita el timer 1 y las interrupciones por desbordamiento de timer 1 y comparación, además se resetea el módulo de comparación y captura, y se asigna el valor correspondiente de la tabla al pórtico A; este proceso es igual para los estados de puntero 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, lo que cambia es el valor a asignar al pórtico A, como se puede observar en la Tabla 3.1.

Si el valor del puntero es 1, se asigna un valor específico al registro principal de las subrutinas de interrupción “Interrupción timer1”, “Interrupción compare module”, para indicar que el pin RAx (x = 0,1,2,3) proporcionará la señal PWM como se muestra en la Tabla 3.1, luego se asigna a los registros temporales del módulo de comparación y captura el valor equivalente al porcentaje de relación de trabajo, se configura al módulo de comparación y captura en modo de comparación; después se llama a la subrutina “Subrutina pwm”, donde se habilita al timer 1 y las interrupciones por desbordamiento de timer 1 y comparación; este proceso es igual para los estados de puntero 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34, lo que cambia es el valor a asignar a los registros temporales del módulo de comparación y captura, para generar las diferentes relaciones de trabajo, Tabla 3.1.

A continuación se realiza una comparación entre el registro menos significativo del error de posición con el punto crítico; en varias pruebas que se realizó se pudo apreciar en el osciloscopio que desde el valor crítico del error de posición hacia

arriba, los micro pasos empiezan a desaparecer, es decir las señales PWM no son notorias, es por ese motivo que se dividió el comportamiento del sistema en dos, del punto critico hacia abajo, el sistema proporciona todos los estados correspondientes a los 40 de la tabla, pero del punto critico hacia arriba los estados se reducen a 8 es decir 4 medios pasos y 4 pasos enteros.

Luego se incrementa, decrementa, en saltos de 1 o de 5, o no se realiza acción, al puntero, dependiendo del valor de error de posición.

3.1.2.3 Interrupción

Cada vez que se produce una interrupción el microcontrolador ejecuta esta sección, donde se empieza con unas líneas de código que recomienda el fabricante para que no se pierdan los valores de los registros de trabajo, de estado y de contador de programa; si no se guarda los valores originales, al regresar de la interrupción se puede causar mal funcionamiento en la lógica del programa o un resultado inesperado de alguna operación.

Luego se realiza comparaciones con las banderas de interrupción, cambio de estado en cualquiera de los 4 bits más significativos del puerto B, igualdad en comparación, desbordamiento de timer 1, desbordamiento de timer 0, para discriminar el tipo de interrupción y poder asistirlas.

Después de ejecutar cualquiera de las interrupciones se debe retornar los valores originales (valores antes de la interrupción) de los registros de trabajo, de estado y de contador de programa y se regresa al programa principal.

3.1.2.3.1 Interrupción puerto B

En la presente sección se procesa la información correspondiente a los contadores principales CONTADOR PC y CONTADOR ENCODER, los cuales se incrementan o decrementan en función de los flancos provenientes de la PC y del ENCODER; el ENCODER utilizado de 400 pulsos por vuelta, proporciona 4

flancos por paso, 2 en la señal A y 2 en la señal B, los cuales se deben discriminar para obtener datos de medida adecuados. Es decir cada 4 flancos (4 interrupciones) bien definidos se incrementa o decrementa el valor del CONTADOR ENCODER; en cambio el computador envía 1 flanco por paso (señal pulsos del computador), y un cambio de estado para designar la dirección de giro (señal dirección del computador); con estas señales se incrementa o decrementa el valor de CONTADOR PC; luego se efectúa la operación de sustracción entre los valores de CONTADOR PC y CONTADOR ENCODER, para obtener el ERROR DE POSICIÓN. De igual manera se dividió esta sección en función al comportamiento del sistema, es decir cuando el error de posición es mayor al punto crítico mencionado en el programa principal y cuando no lo es, de esta manera se logra obtener un mejor tiempo de respuesta del sistema para velocidades relativamente altas. Para finalizar la subrutina, se limpia la bandera de interrupción de esta sección.

3.1.2.3.2 Interrupción compare module

Con esta interrupción se produce la relación de trabajo requerida para el control del motor de pasos, Tabla 3.1, para ello se genera el flanco de bajada de la señal PWM activa; es decir que el pin RAx (x = 0,1,2,3) cambia de estado a 0L, por lo que se efectúa varias comparaciones con el registro principal de esta subrutina, mencionado en el programa principal, y de esa manera se conoce que pin del pórtico A debe cambiar de estado. Al finalizar la subrutina, se limpia la bandera de interrupción.

3.1.2.3.3 Interrupción timer 0

Con esta subrutina se envía cíclicamente a través de comunicación serial los datos SOH (caracter ascii “1”) tamaño 1 byte, CONTADOR ENCODER tamaño 2 bytes, CONTADOR PC tamaño 2 bytes, ERROR DE POSICIÓN tamaño 3 bytes, uno por interrupción, en función a un contador, es decir que cada vez que se genera interrupción por desbordamiento del timer 0 se envía un byte al

microcontrolador encargado de la visualización de posición absoluta. Para finalizar, se limpia la bandera de interrupción de esta subrutina.

3.1.2.3.4 Interrupción timer 1

Esta interrupción permite generar una base de tiempo de 0.4ms para obtener una señal PWM de 2.5kHz de frecuencia en el pin RAx (x = 0,1,2,3), para lo cual se genera el flanco de subida de la señal PWM activa cada vez que se ingrese a esta subrutina, además se debe considerar que en esta subrutina se asigna los valores de comparación para el módulo de comparación y captura, para que el programa funcione correctamente. Al terminar, se limpia la bandera de interrupción de desbordamiento de timer 1.

3.1.2.4 Subrutina resta 16 bits

Se emplea esta subrutina para efectuar la operación de sustracción entre los valores de CONTADOR PC y CONTADOR ENCODER, para ello se realiza la sustracción por partes, primero entre los bytes menos significativos de los contadores mencionados anteriormente, además se almacena el valor de acarreo en algún registro temporal para utilizarlo posteriormente, luego se efectúa otra sustracción entre los bytes más significativos de los contadores, y por último se efectúa otra sustracción entre el byte más significativo del resultado y el registro temporal.

3.1.2.5 Subrutina pwm

Esta subrutina activa al timer 1 y las interrupciones por desbordamiento de timer 1 y por igualdad en comparación del módulo de comparación y captura.

3.1.3 DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROGRAMA DE CONTROL DE POSICIÓN

A continuación se presenta los diagramas de flujo que conforman el programa de control de posición.

3.1.3.1 Programa principal

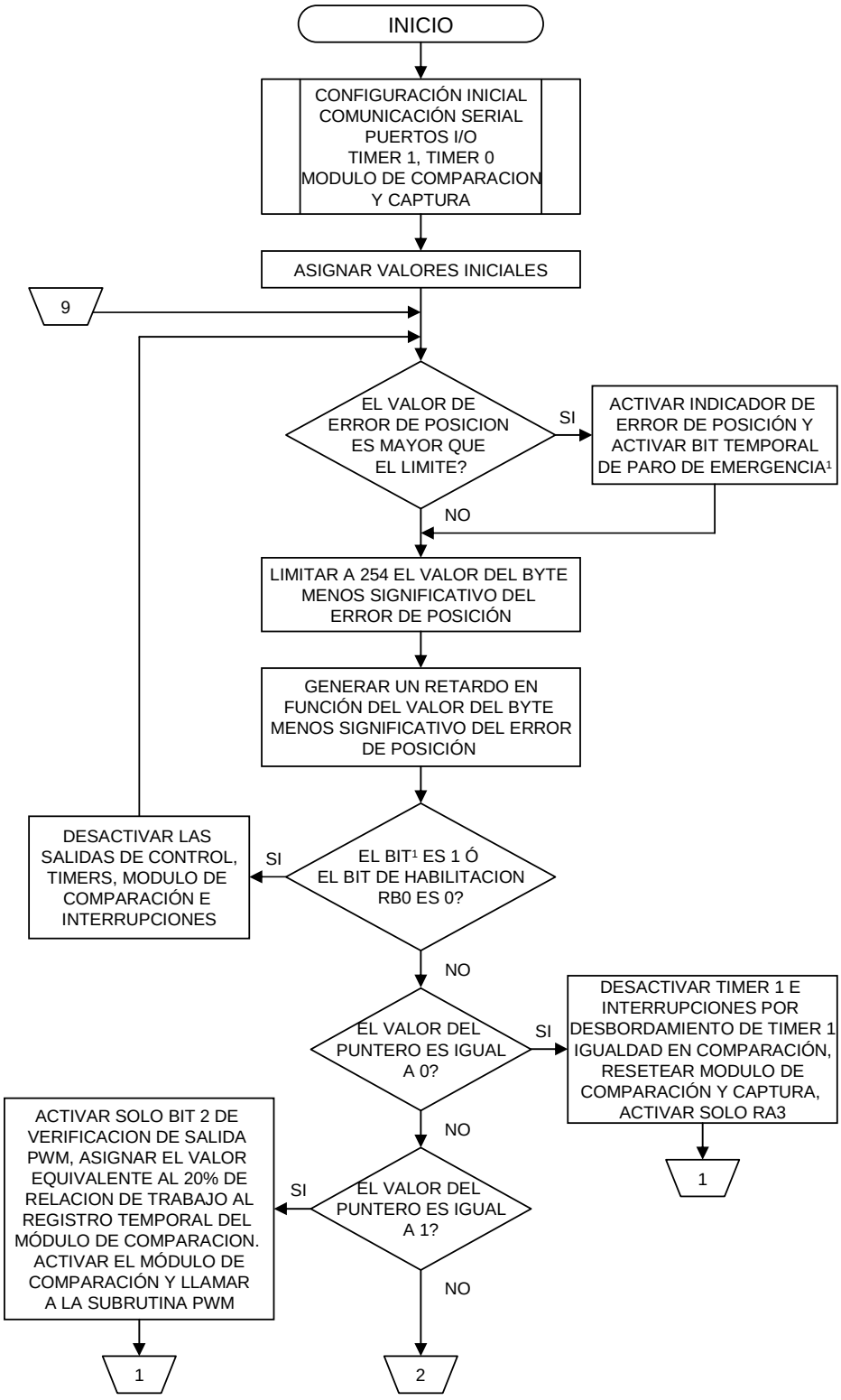


Figura 3.1 Programa principal PARTE1

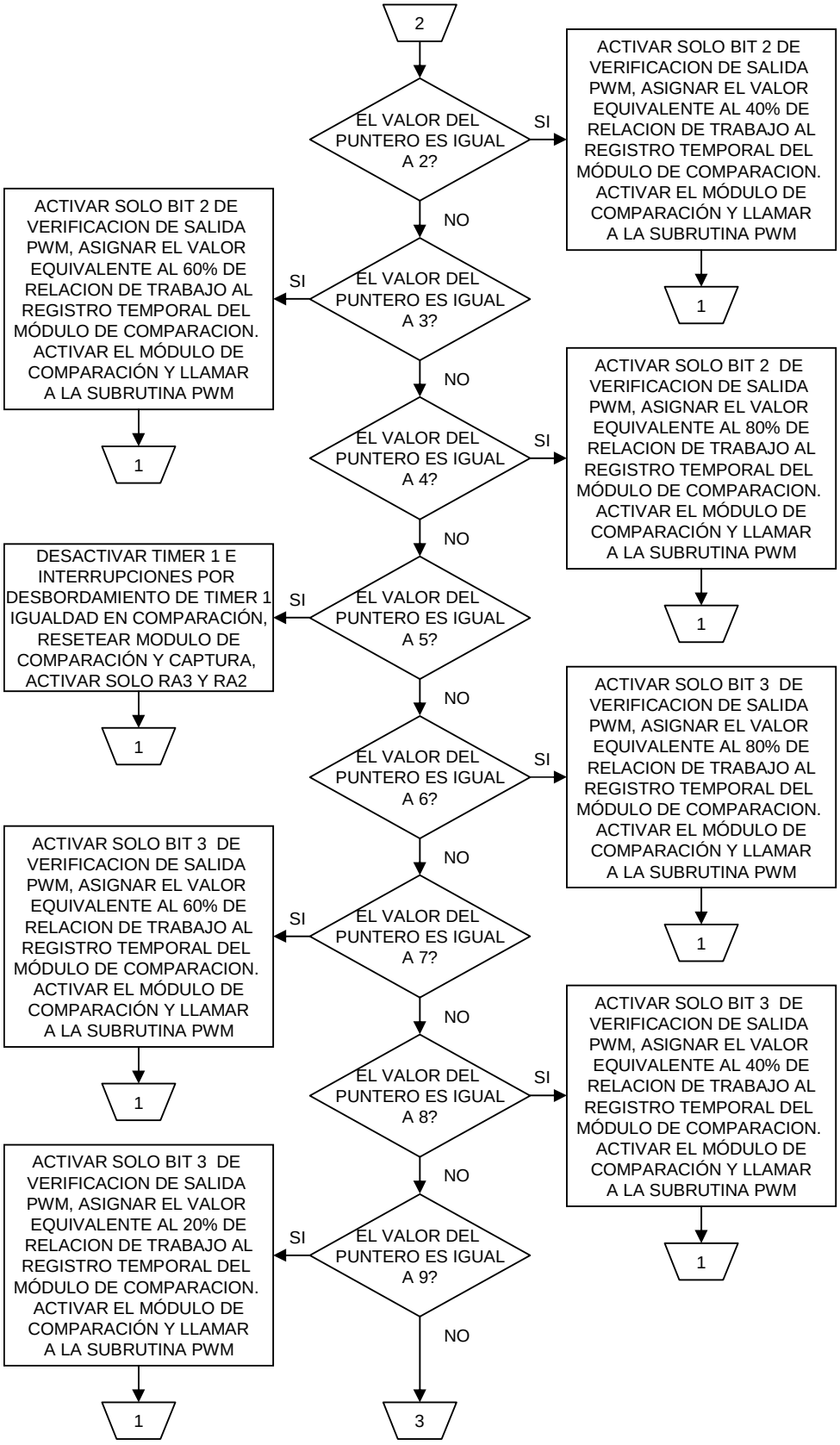


Figura 3.2 Programa principal PARTE2

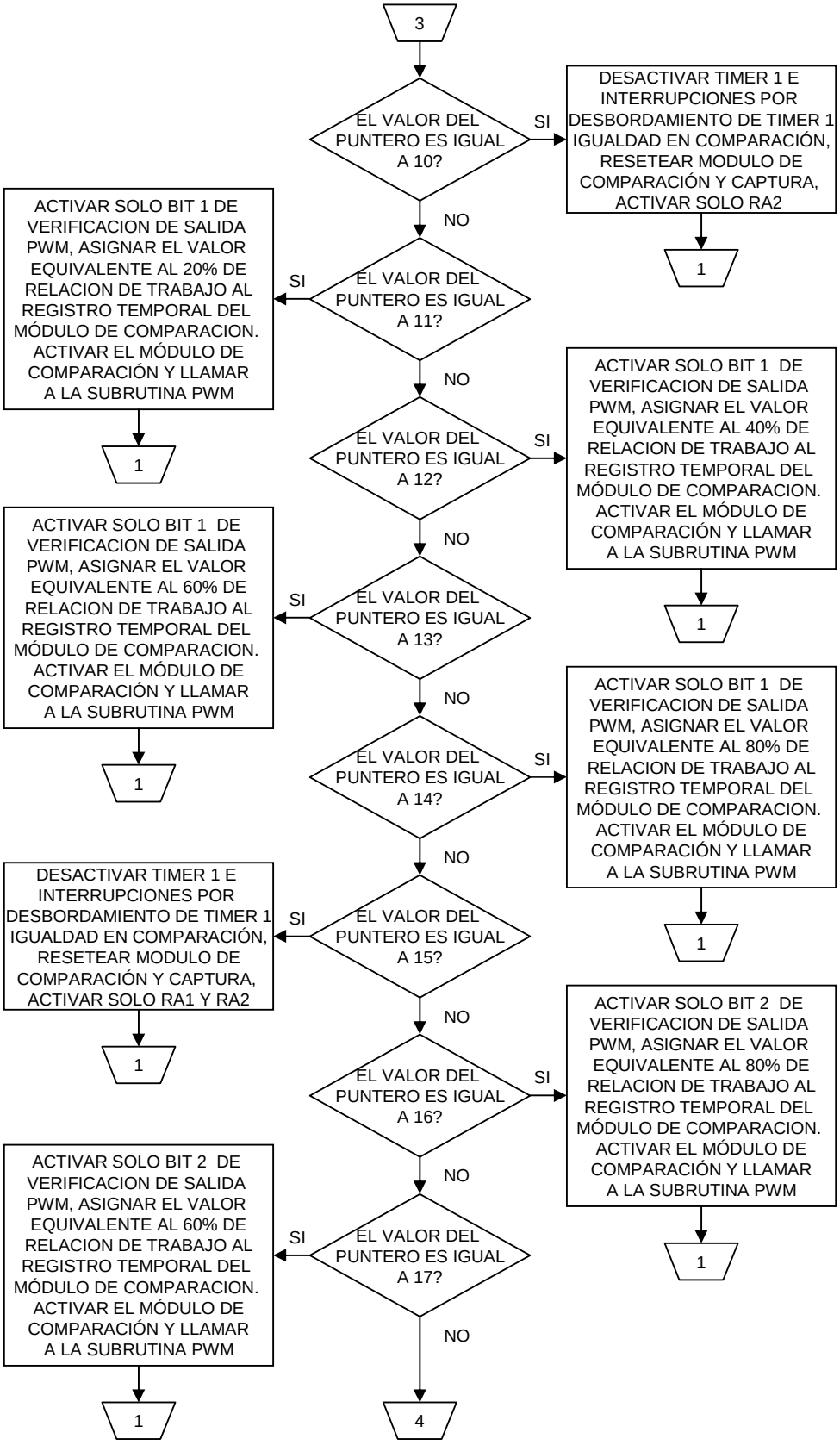


Figura 3.3 Programa principal PARTE3

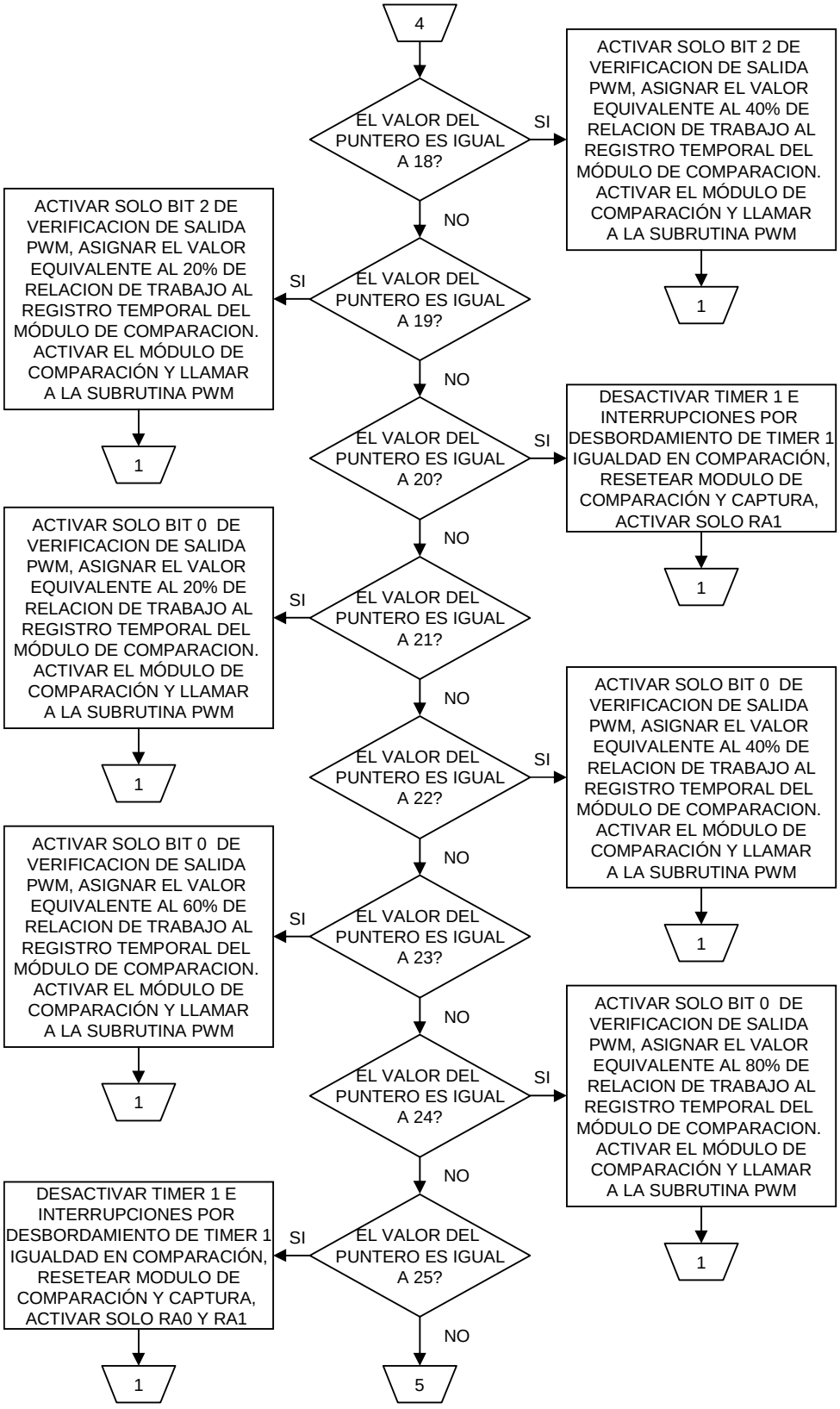


Figura 3.4 Programa principal PARTE4

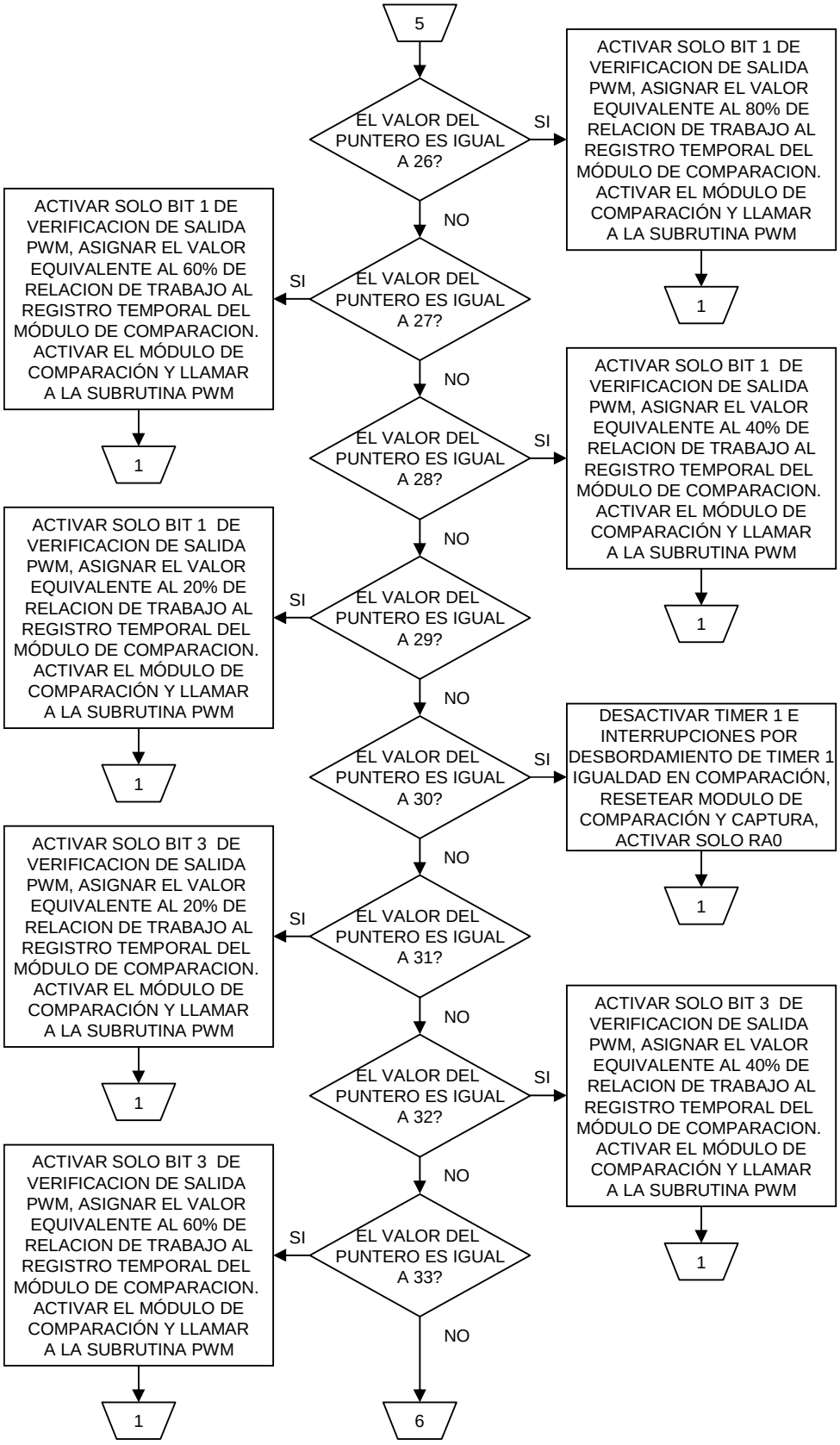


Figura 3.5 Programa principal PARTE5

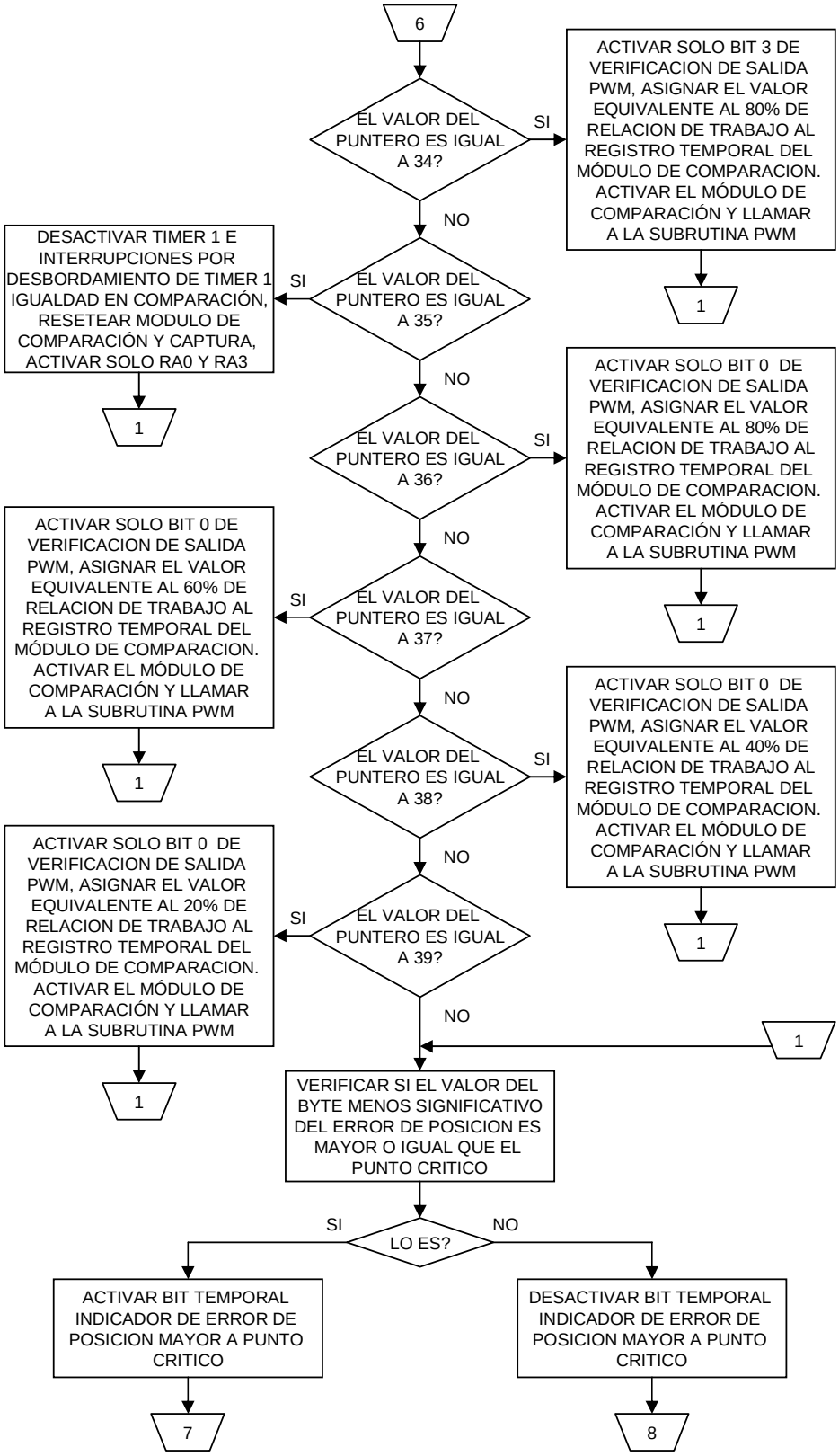


Figura 3.6 Programa principal PARTE6

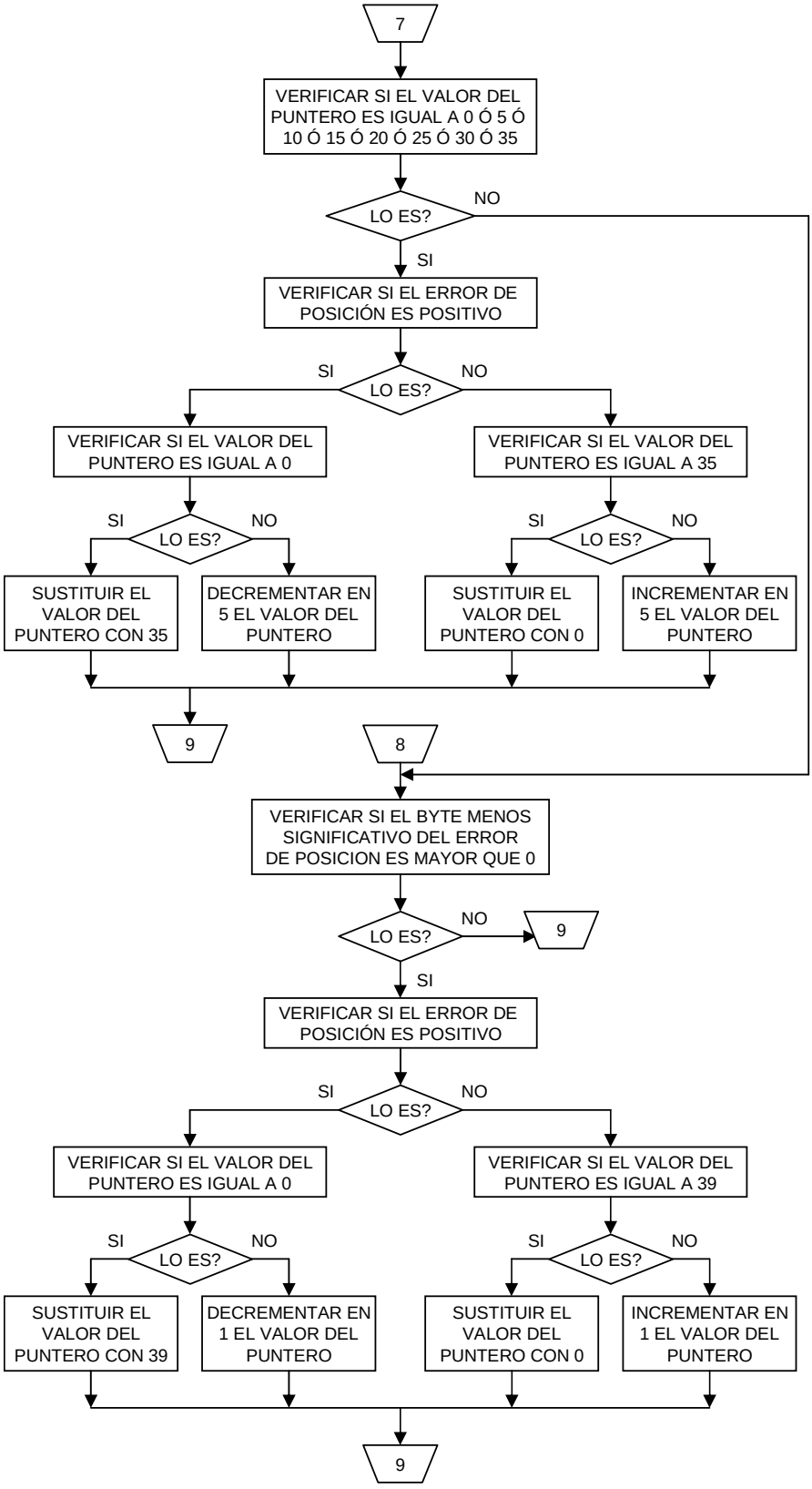


Figura 3.7 Programa principal PARTE7

3.1.3.2 Interrupción

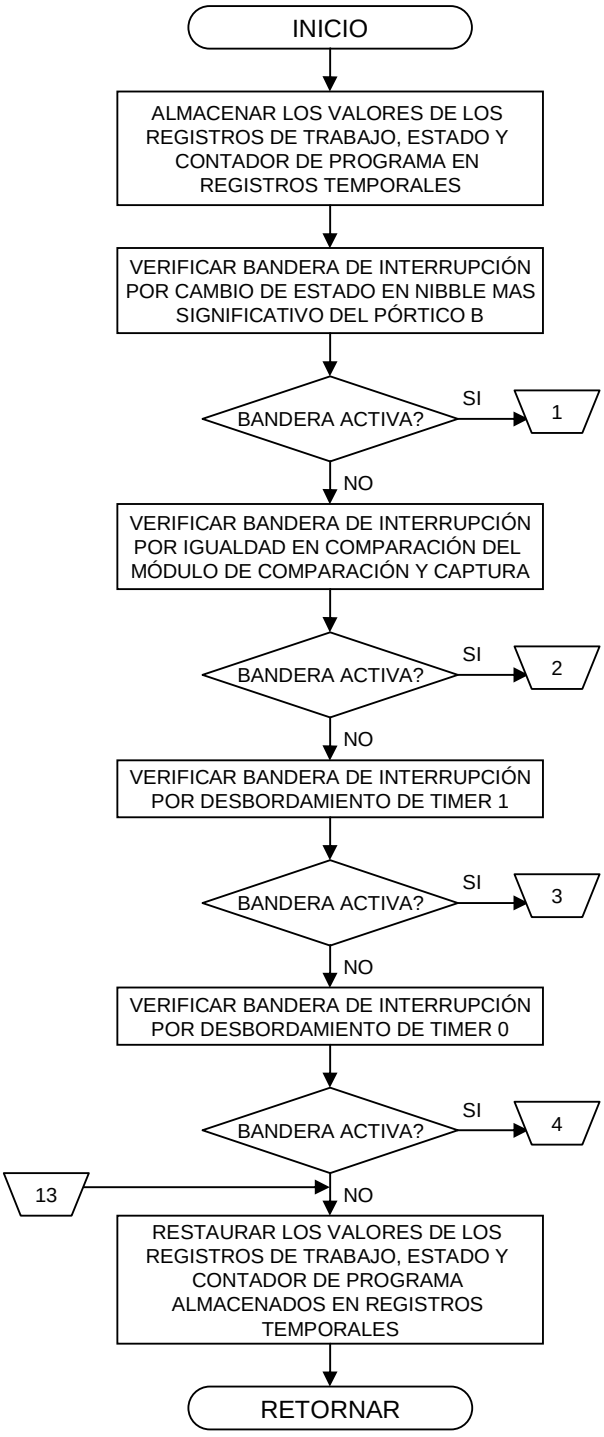


Figura 3.8 Interrupción

3.1.3.2.1 Interrupción puerto B

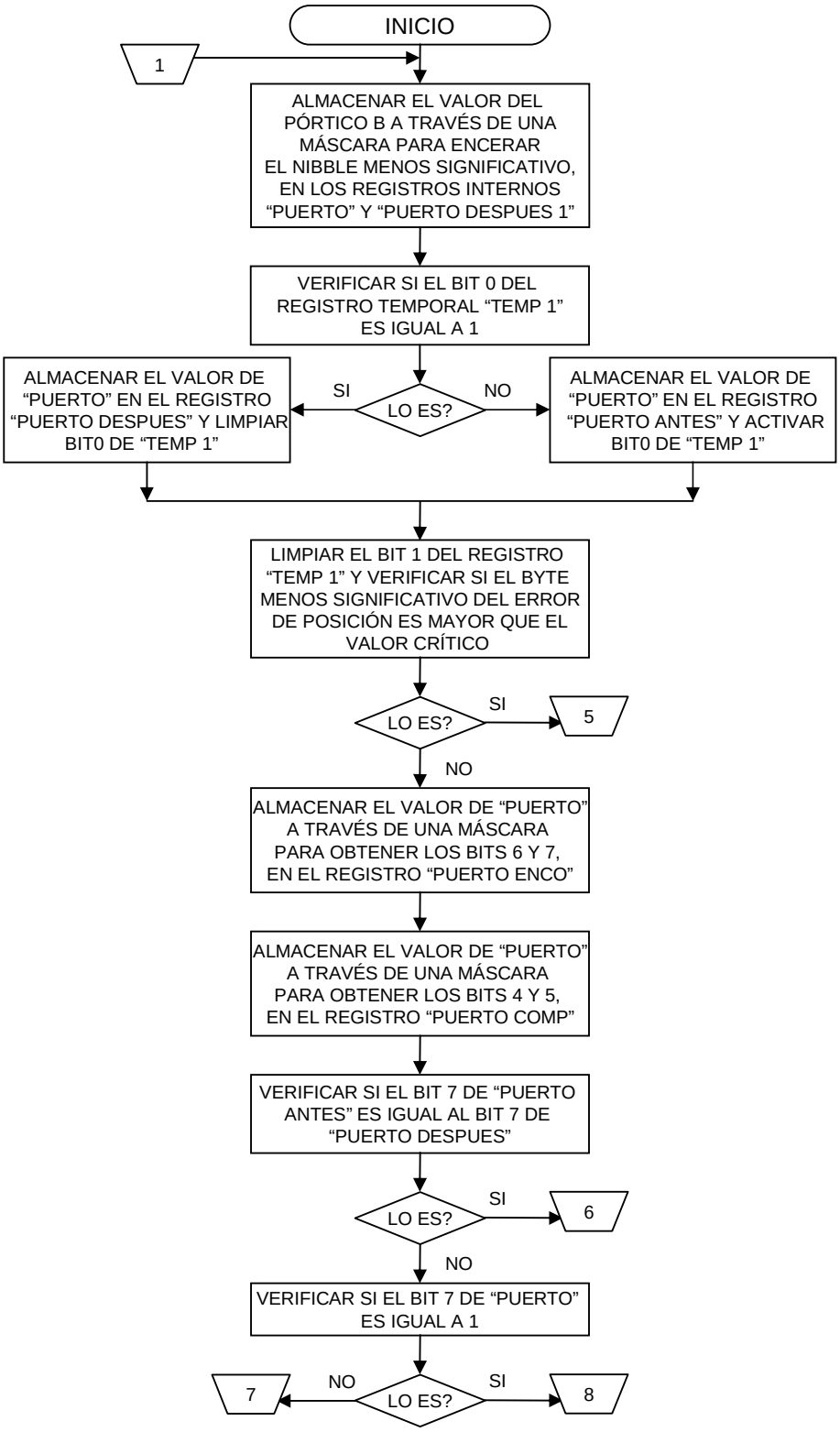


Figura 3.9 Interrupción puerto B PARTE1

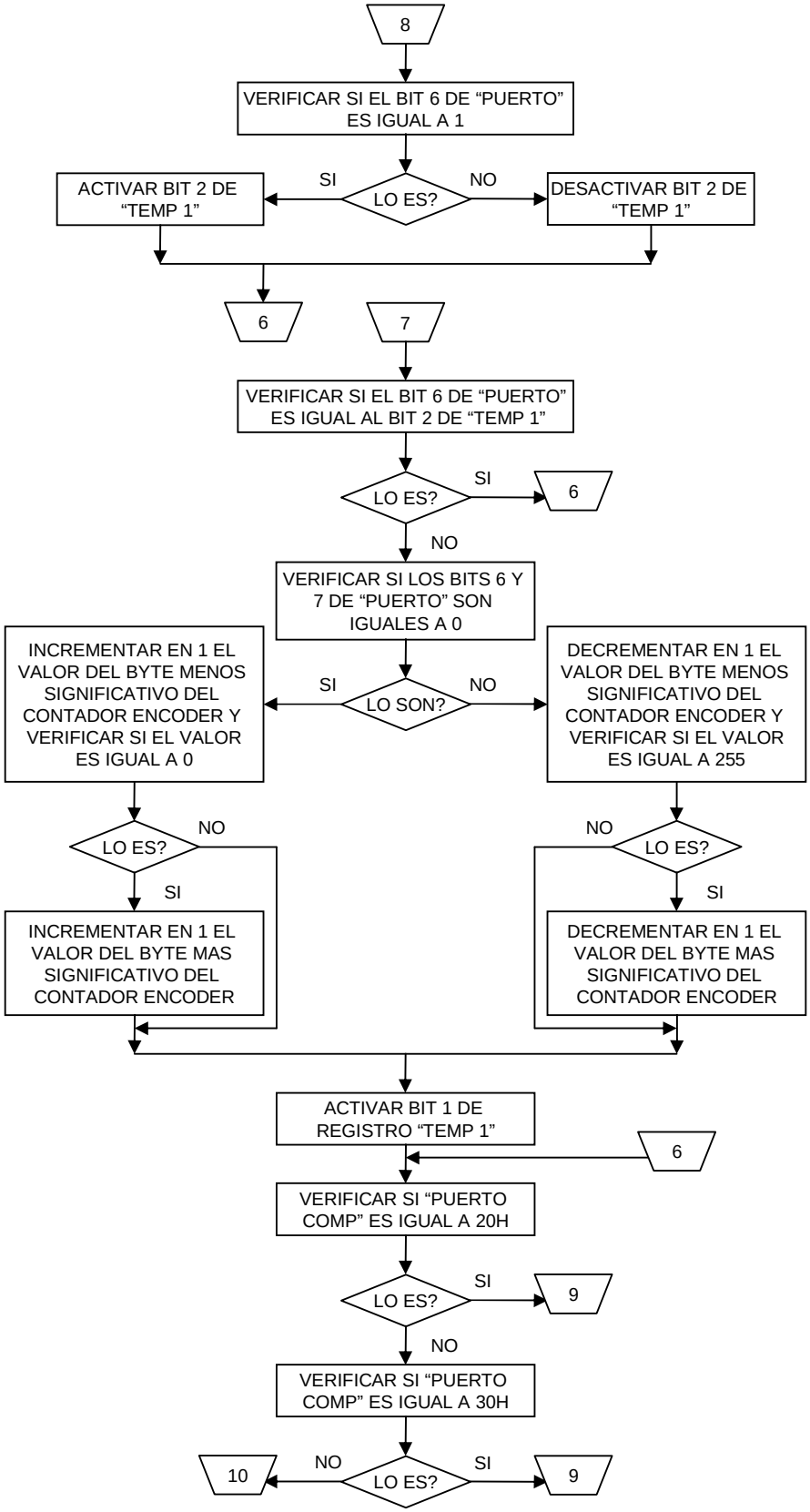


Figura 3.10 Interrupción puerto B PARTE2

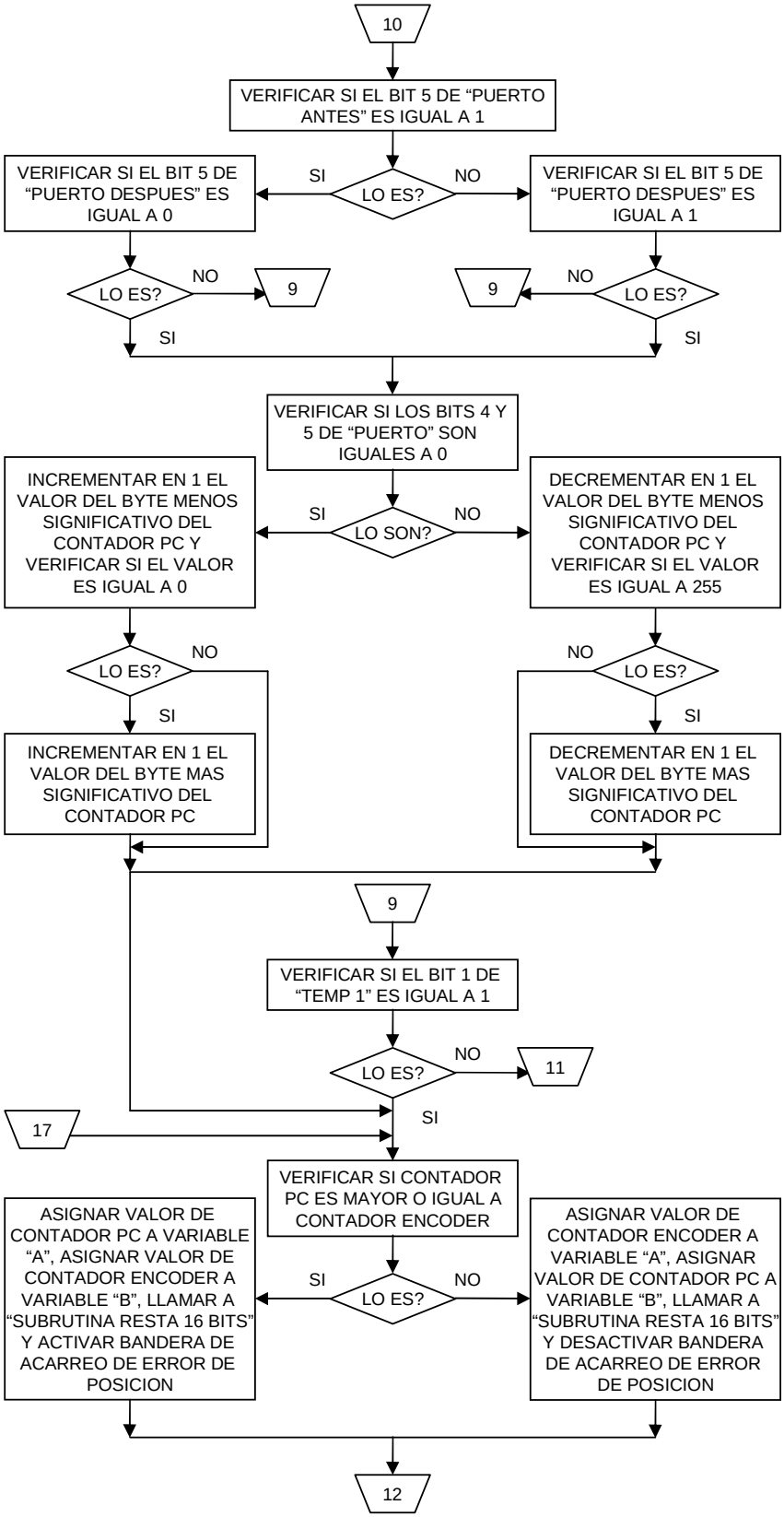


Figura 3.11 Interrupción puerto B PARTE3

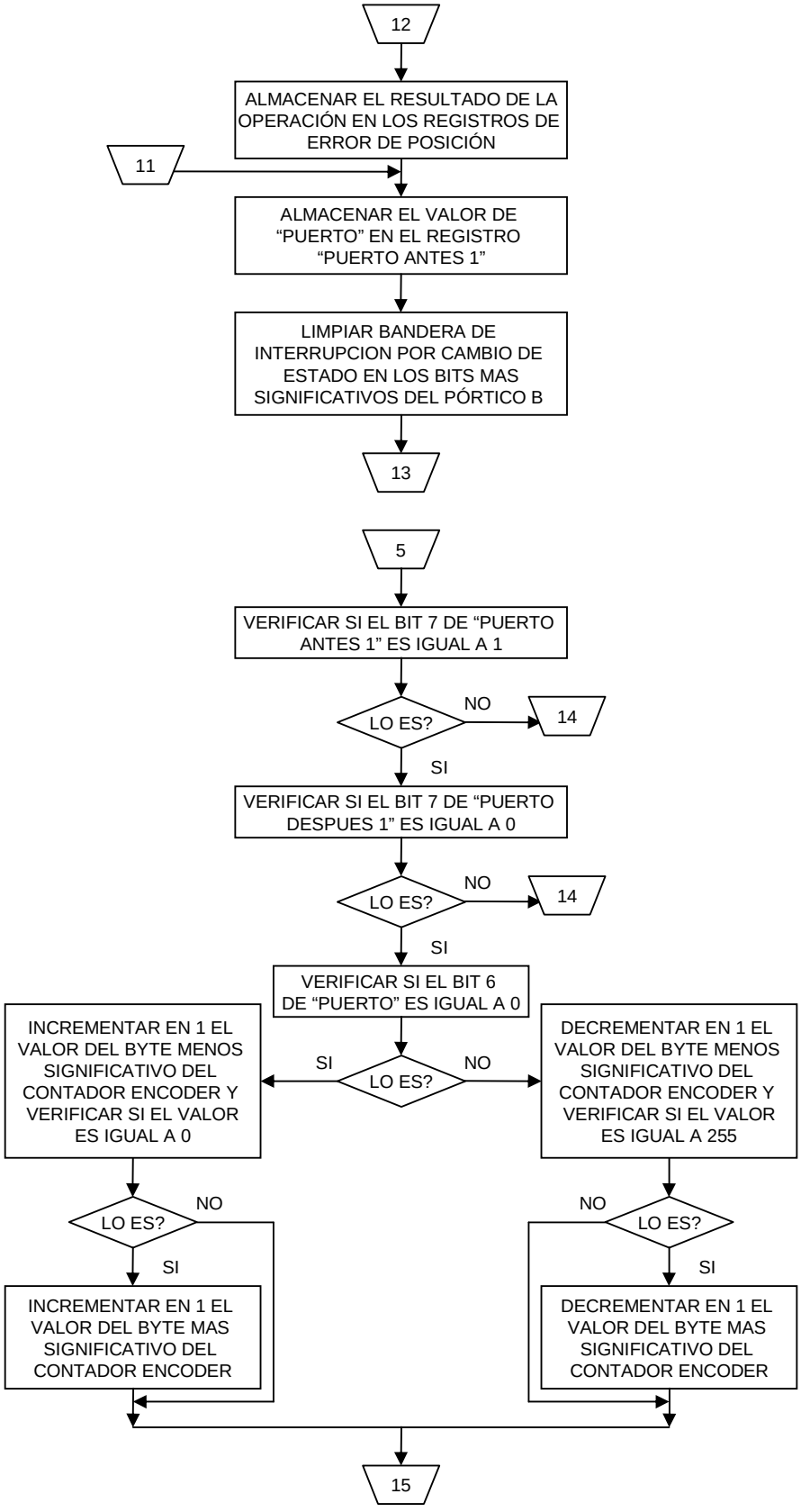


Figura 3.12 Interrupción puerto B PARTE4

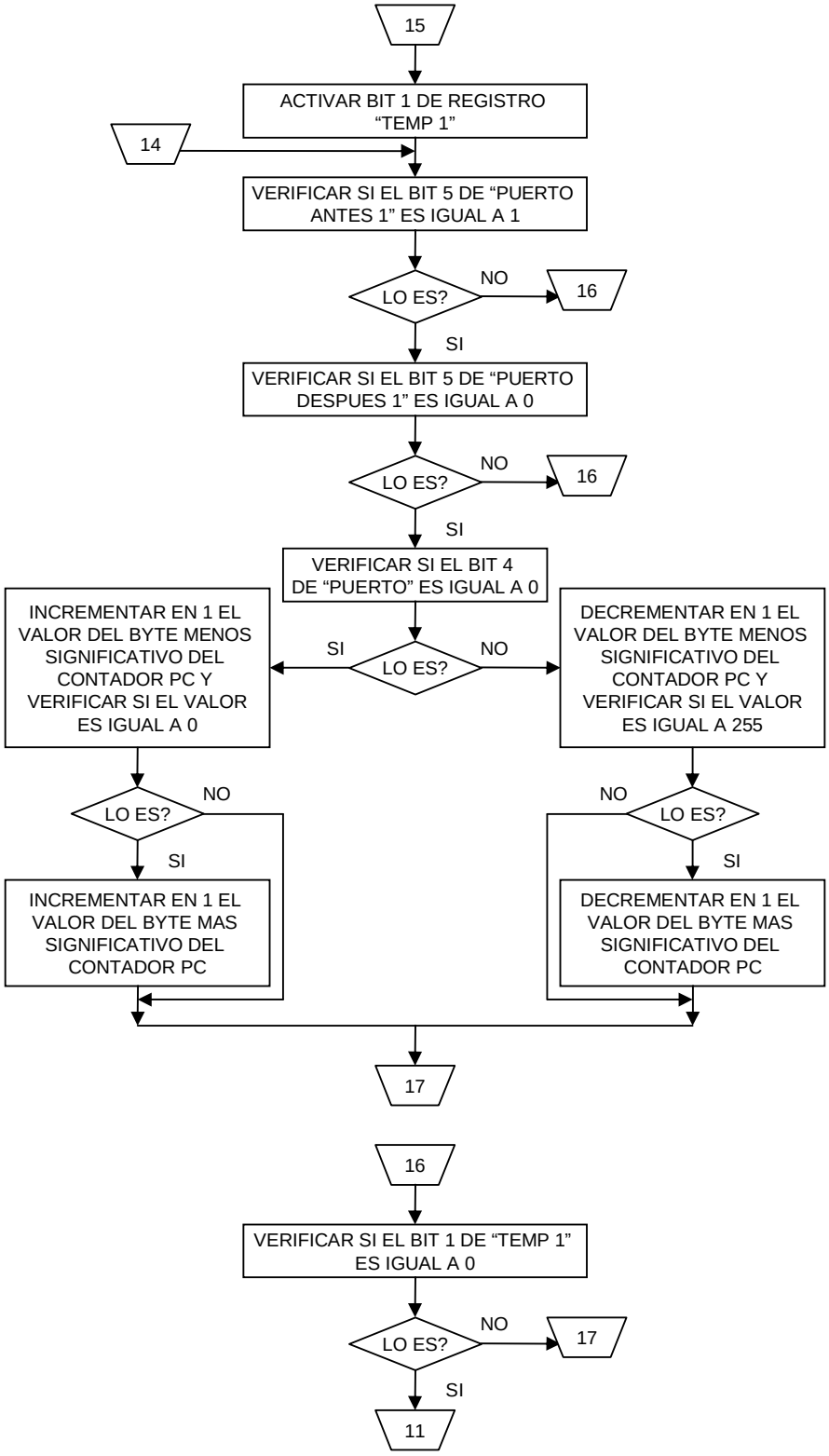


Figura 3.13 Interrupción puerto B PARTE5

3.1.3.2.2 Interrupción compare module

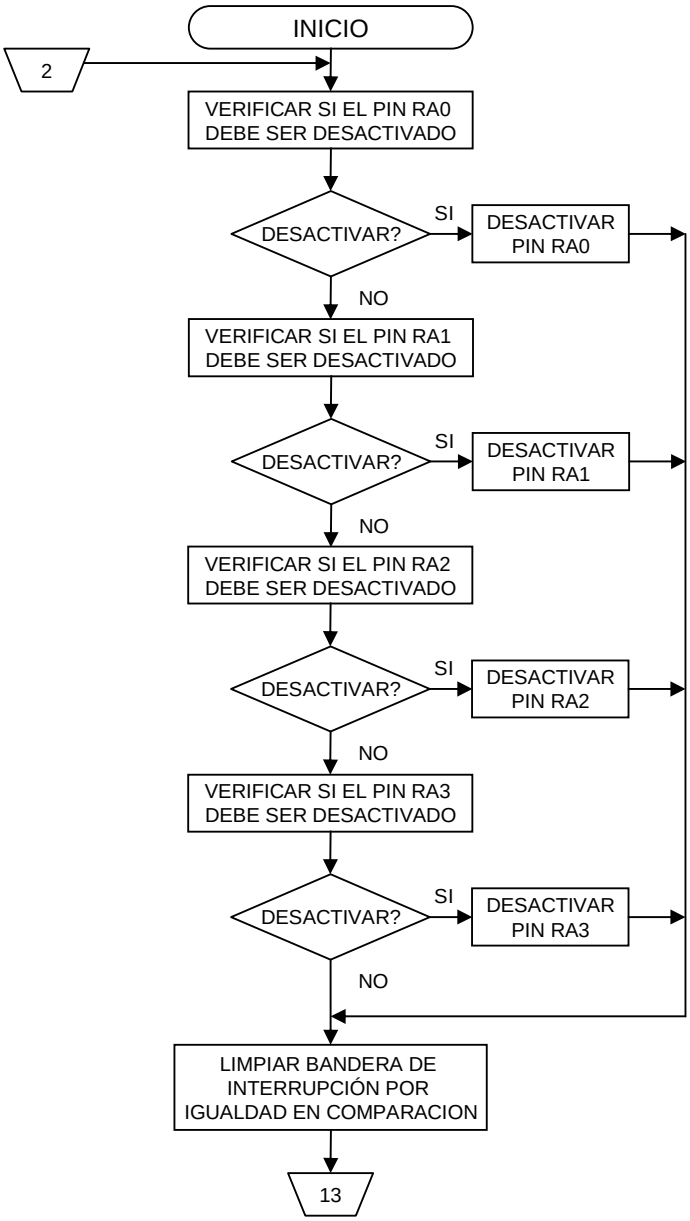


Figura 3.14 Interrupción compare module

3.1.3.2.3 Interrupción timer 1

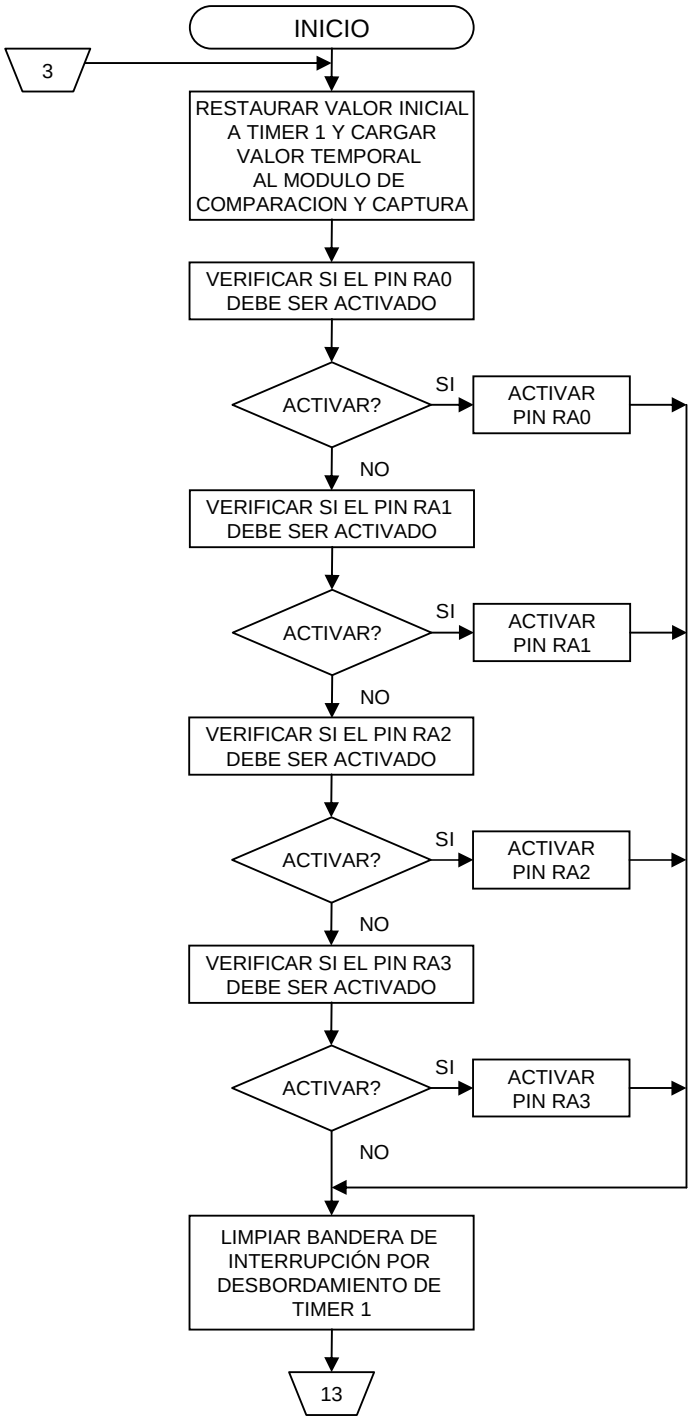


Figura 3.15 Interrupción timer 1

3.1.3.2.4 Interrupción timer 0

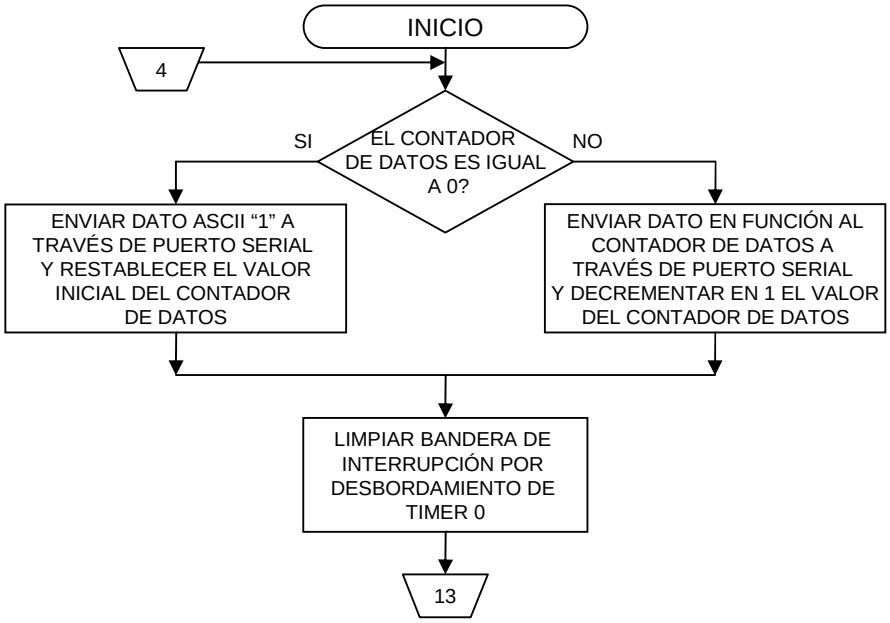


Figura 3.16 Interrupción timer 0

3.1.3.3 Subrutina resta 16 bits

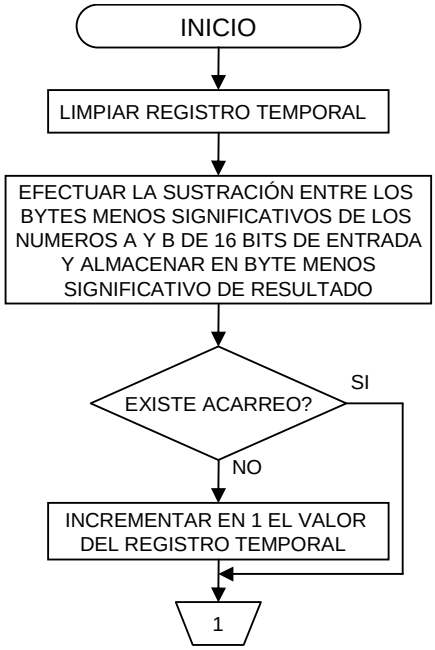


Figura 3.17 Subrutina resta 16 bits PARTE1

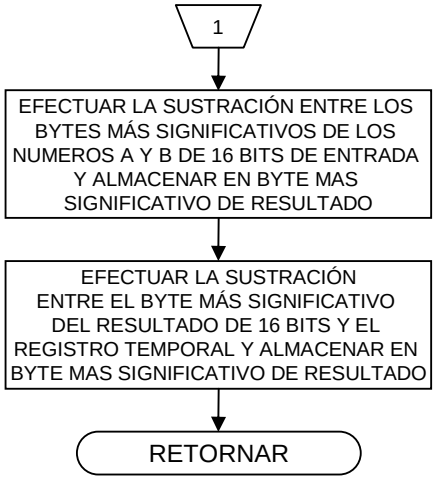


Figura 3.18 Subrutina resta 16 bits PARTE2

3.1.3.4 Subrutina pwm

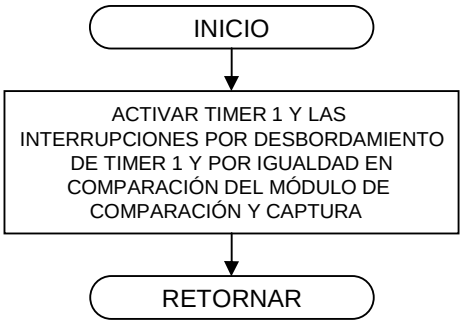


Figura 3.19 Subrutina pwm

3.1.4 DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CONTROL DE CORRIENTE

Se utilizó el lenguaje de programación BASIC (PICBasic Pro) para escribir este programa ya que se distingue por utilizar funciones muy cortas pero de gran utilidad cuando se maneja periféricos, por ejemplo, con una sola instrucción se puede obtener una señal PWM de frecuencia y relación de trabajo personalizables, a través de un canal definido por el usuario; con esto se reduce sustancialmente la cantidad de líneas de código de programa para el usuario, lo que hace de esta herramienta muy útil; cabe mencionar que al utilizar el lenguaje

PICBasic, se obtiene mayor número de líneas de código ensamblador que si se utilizara directamente el lenguaje assembler para obtener el mismo resultado.

Se utilizó el microcontrolador PIC 16F877A y su programación fue realizada con la herramienta de desarrollo MicroCode Studio de Mecanique.

El programa esta encargado de realizar la visualización de la información de posición absoluta por medio del barrido de displays de 7 segmentos, así como de limitar la corriente que circula a través del motor de pasos.

3.1.4.1 Configuración

Se comienza con algunas definiciones como; frecuencia de oscilador principal, parámetros de módulo de conversión analógico a digital; en las ayudas del compilador PICBasic Pro se puede encontrar la configuración más adecuada para algunos periféricos y la manera de utilización de las instrucciones.

A continuación se asigna las variables de tipo arreglo, palabra, byte; se configura el periférico de comunicación para obtener las mismas características de comunicación del otro microcontrolador.

Después se configura los pórticos de entrada/salida del microcontrolador; para el pórtico A se selecciona todos los pines como entradas, de las cuales se utiliza los pines RA0 y RA1 como entradas analógicas.

Para el pórtico B se configura los pines RB0 a RB6 como salidas, para conocer su función mirar la Tabla 2.1. Se configura al pin RC2 del pórtico C como salida, la cual genera la señal de control de límite de corriente; y al pin RC7 como entrada de recepción serial de datos.

Para el pórtico D se configura los pines RD0 a RD6 como salidas, para manejar los 7 segmentos de los display. Se habilita las interrupciones, global, por periférico

y por recepción serial. Luego se asigna los valores iniciales requeridos para que el sistema funcione correctamente.

3.1.4.2 Programa principal

Se empieza con una comparación entre el valor de corriente de la resistencia de sensado y un valor máximo preestablecido, para efectuar o no un paro de emergencia, al activar el indicador de error de sobrecorriente, y desactivar la salida PWM de control de corriente.

Se obtiene el valor de CONTADOR ENCODER 16 bits, mediante operaciones matemáticas con los registros de 8 bits provenientes del microcontrolador 2, luego se escala el valor resultante para obtener CONTADOR ENCODER en milímetros, además se efectúa una comparación para obtener el bit de signo, el cual activará o no la salida RB6 de visualización de signo.

Luego se obtiene cada dígito decimal del valor de CONTADOR ENCODER en milímetros, cada cierto número de repeticiones del lazo de programa principal, con el objetivo de tener una frecuencia de refresco de visualización de información estable.

A continuación se efectúa el código de barrido de displays, para lo cual se convierte la información decimal de cada digito a información de 7 segmentos, y se la envía al pórtico D, se ejecuta una pausa de pocos micro segundos, se deshabilita la salida RBx (x = 1,2,3,4,5) correspondiente al dígito a mostrar, luego se llama a la “Subrutina AD”, se habilita la salida RBx y se ejecuta una pausa de pocos micro segundos, este procedimiento se repite para los 5 display de 7 segmentos.

3.1.4.3 Subrutina AD

Se lee las entradas analógicas correspondientes a los valores de corriente del motor de pasos y set point para almacenarlos en registros internos del

microcontrolador, acción que se ejecuta cada cierto número de veces que se llama a la “Subrutina AD”.

Se limita internamente el valor de set point, para evitar problemas de sobrecorriente.

Se efectúa varias comparaciones entre el valor de set point y el valor medido de corriente, para aumentar o disminuir la relación de trabajo de la señal PWM de control de límite de corriente, tratando que siempre sean iguales, como resultado se limita la corriente del motor, al valor del set point.

A continuación se realiza una comparación entre el valor de error de posición y un valor superior al punto crítico mencionado en el programa del microcontrolador 2, con la finalidad de obtener una relación de trabajo del 100% ya que con la instrucción de PWM por hardware de PICBasic Pro no se la obtiene; es decir que, si el valor es mayor al punto de comparación, se activa permanentemente la salida RC2, caso contrario, se habilita la señal PWM por hardware en el mismo pin con relación de trabajo calculada anteriormente y frecuencia de 20kHz, escogida por ser mucho mayor a la frecuencia de los micro pasos. Por último se ejecuta un pequeño retardo y se retorna al programa principal.

3.1.4.4 Interrupción

La subrutina de interrupción se utiliza para recibir los datos enviados por el microcontrolador 2, para ello se tiene un protocolo de comunicación unidireccional, el cual está conformado por 8 bytes, el primero corresponde al inicio de comunicación (SOH), los demás corresponden a CONTADOR ENCODER de 2 bytes, CONTADOR PC de 2 bytes, ERROR DE POSICION de 3 bytes. Entonces cada vez que se ejecuta la interrupción, se recibe un byte, se efectúa varias comparaciones, se almacena el dato recibido y se restituye la bandera de interrupción por recepción de datos.

3.1.5 DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROGRAMA DE CONTROL DE CORRIENTE

A continuación se presenta los diagramas de flujo que conforman el programa de control de límite de corriente.

3.1.5.1 Programa principal

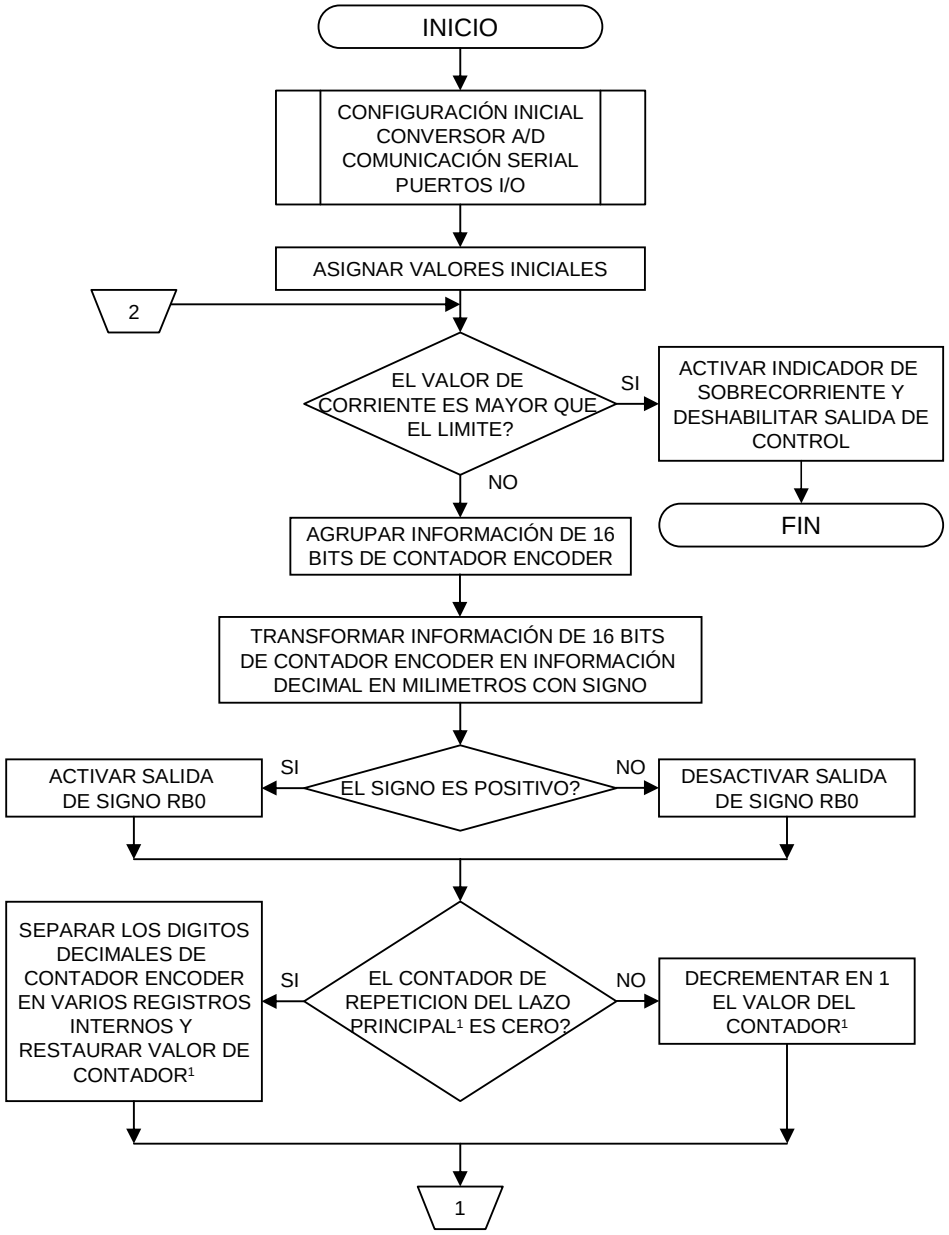


Figura 3.20 Programa principal PARTE1

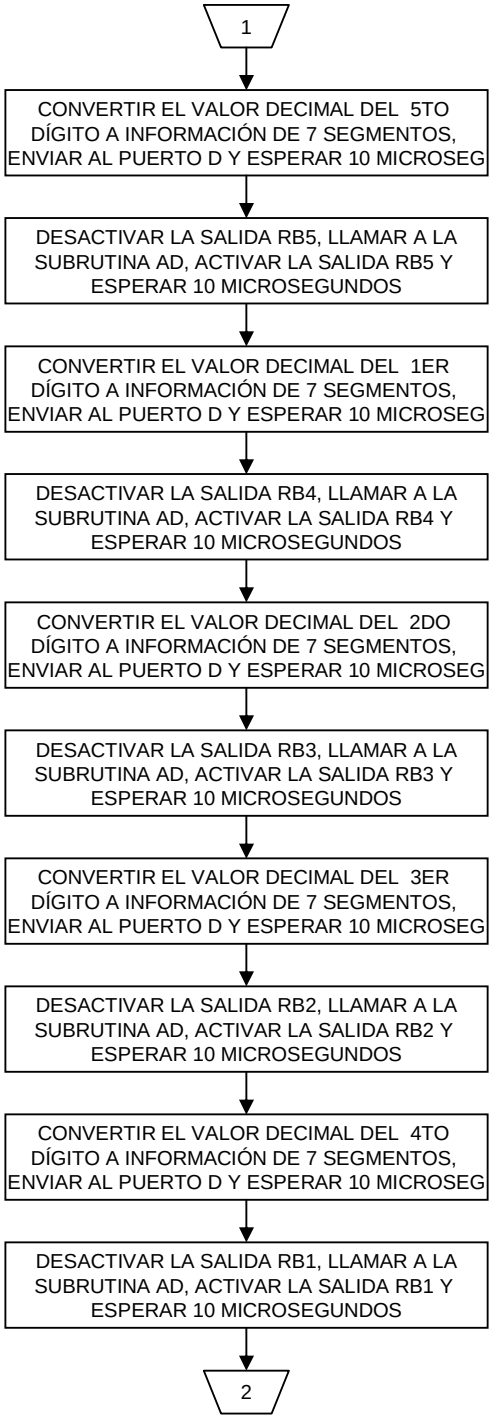


Figura 3.21 Programa principal PARTE2

3.1.5.2 Subrutina AD

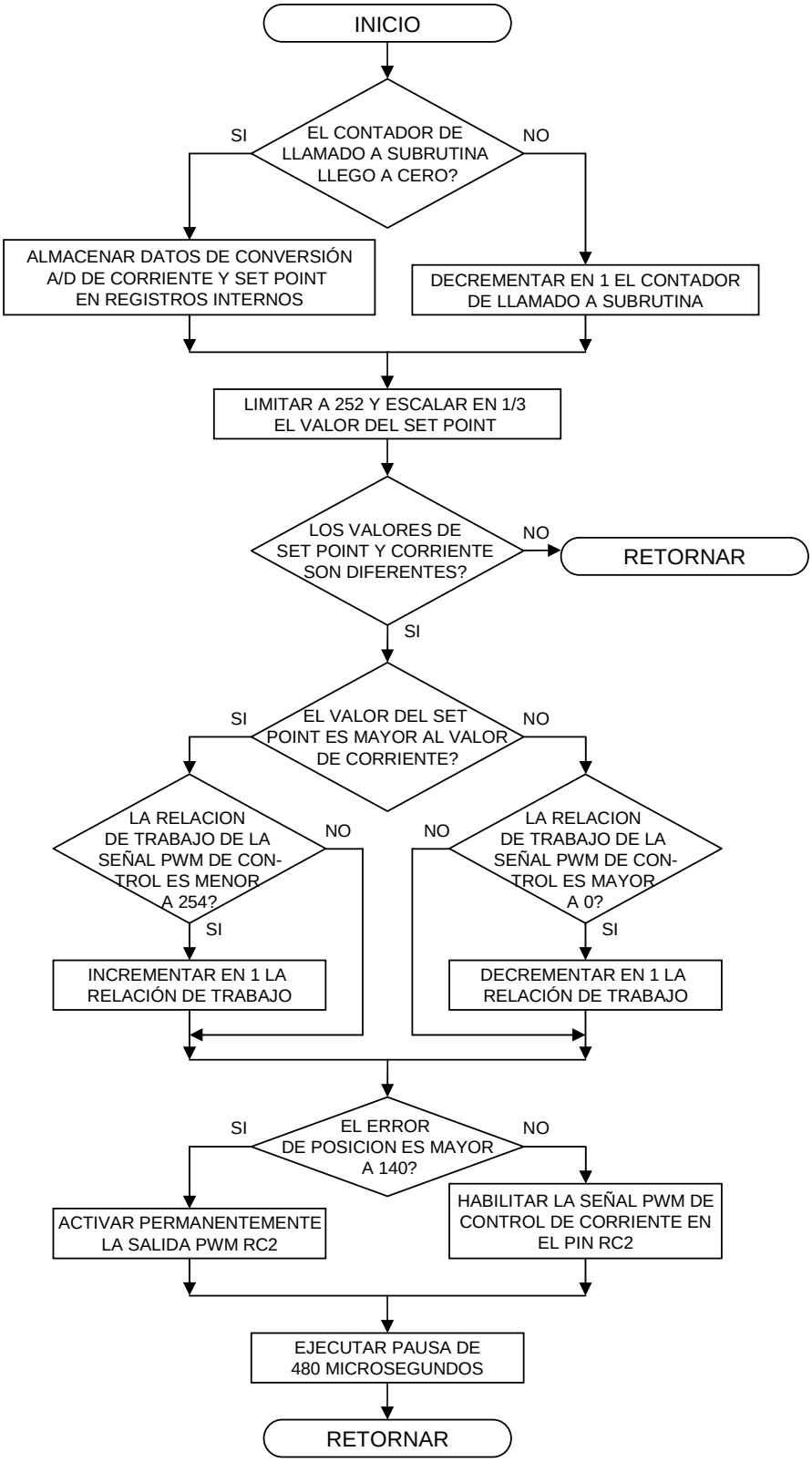


Figura 3.22 Subrutina AD

3.1.5.3 Interrupción

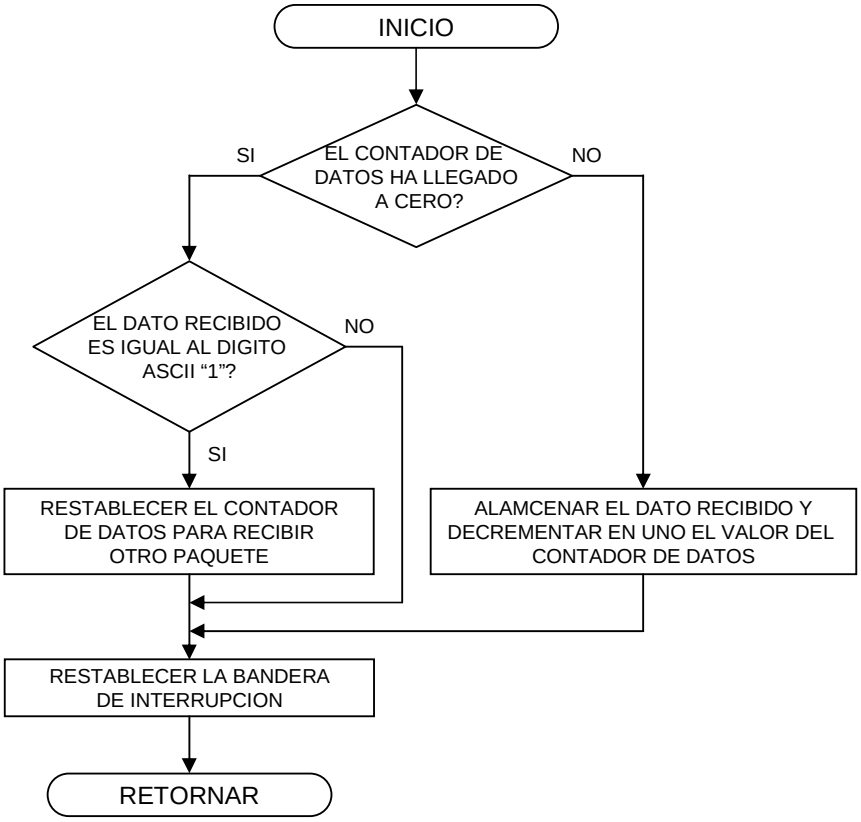


Figura 3.23 Interrupción

3.2 PROGRAMA INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA

3.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Este programa se ejecuta en el computador, sirve como interfaz de operador, ya que permite llamar a los programas de diseño, manufactura y control, está conformado por una pantalla donde se tiene un menú para seleccionar el programa a utilizar.

La Figura 3.24 presenta una captura de pantalla del programa interfaz hombre máquina.

Figura 3.24 Pantalla principal de programa HMI

3.2.2 DESARROLLO DEL PROGRAMA HMI

Para la elaboración de este programa se utilizó la herramienta de desarrollo Visual Basic 6.0 de Microsoft ya que maneja fácilmente el entorno visual. La pantalla del HMI consta de un rótulo en la parte superior, de la escuela, obtenido de la página web vigente en octubre del 2008 (http://www.epn.edu.ec/), además de una leyenda en la zona inferior izquierda que informa acerca del proyecto de titulación; por último en la parte inferior derecha se tiene el menú de los programas de diseño, manufactura y control.

Ya que Visual Basic es un lenguaje de programación orientado a objetos, para este proyecto se ha empleado un formulario y cuatro botones de acción, los cuales son: botón NX, botón BobCAD-CAM, botón Mach3Mill y botón SALIR, Figura 3.24; para el correcto desempeño del programa se debe declarar al

comienzo la función del API ShellExecute, además debe ser configurada como “privada” ya que se va a declarar en el propio formulario.

```
Private Declare Function ShellExecute Lib "shell32.dll" Alias _
    "ShellExecuteA" (ByVal hwnd As Long, ByVal lpOperation As String, _
    ByVal lpFile As String, ByVal lpParameters As String, _
    ByVal lpDirectory As String, ByVal nShowCmd As Long) As Long
```

Figura 3.25 Declaración de función ShellExecute, tomado de [19]

Si el botón etiquetado “NX” es presionado, se llama a la función ShellExecute para ejecutar al programa NX.

```
Private Sub Command1_Click()
    Call ShellExecute(Me.hWnd, "Open", "C:\Archivos de programa\UGS\NX
5.0\UGII\ugraf.exe", "", "", 1)
End Sub
```

Figura 3.26 Llamado de función ShellExecute para archivo ejecutable, tomado de [19]

Si el botón etiquetado “BobCAD-CAM” es presionado, se llama a la función ShellExecute para ejecutar al programa BobCAD-CAM.

```
Private Sub Command2_Click()
    Call ShellExecute(Me.hWnd, "Open", "C:\Archivos de programa\BobCAD-
CAM\BobCAD-CAM V21\Bobcad21.exe", "", "", 1)
End Sub
```

Figura 3.27 Llamado de función ShellExecute para archivo ejecutable, tomado de [19]

Si el botón etiquetado “Mach3Mill” es presionado, se llama a la función ShellExecute para ejecutar al programa Mach3Mill, pero la característica especial es que el comando no ejecuta directamente el archivo ejecutable, ya que existe

un problema al hacerlo, es por esto que se debe ejecutar el acceso directo al programa (archivo .lnk).

```
Private Sub Command3_Click()
    Call ShellExecute(Me.hWnd, "Open", "C:\Mach3\Mach3Mill", "", "", 1)
End Sub
```

Figura 3.28 Llamado de función ShellExecute para enlace de acceso directo, tomado de [19]

Si se presiona el botón etiquetado como “SALIR”, se utiliza el comando Shell (Taskkill) para cerrar todos los programas que se haya abierto (los del menú) y por ultimo cerrar el programa HMI.

```
Private Sub Command4_Click()
    Shell ("cmd.exe /c Taskkill /f /IM ugraf.exe")
    Shell ("cmd.exe /c Taskkill /f /IM bobcad21.exe")
    Shell ("cmd.exe /c Taskkill /f /IM mach3.exe")
    Shell ("cmd.exe /c Taskkill /f /IM hmi.exe")
End Sub
```

Figura 3.29 Cierre de programas activos, tomado de [20]

3.2.3 DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROGRAMA HMI

A continuación se presenta los diagramas de flujo que conforman el programa interfaz hombre máquina.

3.2.3.1 Formulario principal

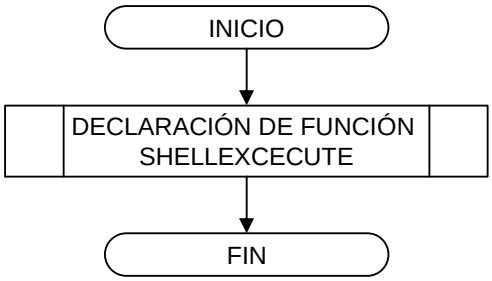


Figura 3.30 Formulario principal

3.2.3.2 Objeto NX

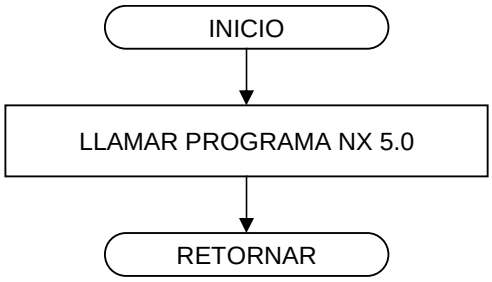


Figura 3.31 Objeto NX

3.2.3.3 Objeto BobCAD-CAM

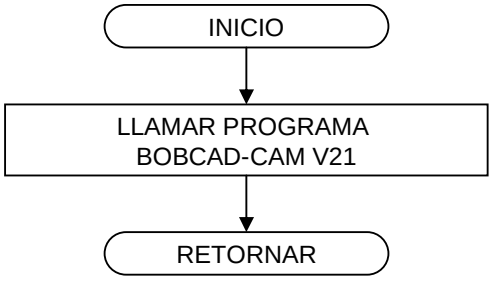


Figura 3.32 Objeto BobCAD-CAM

3.2.3.4 Objeto Mach3Mill

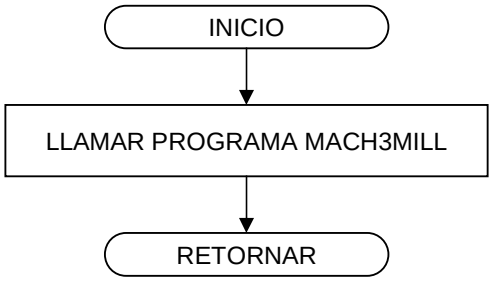


Figura 3.33 Objeto Mach3Mill

3.2.3.5 Objeto SALIR

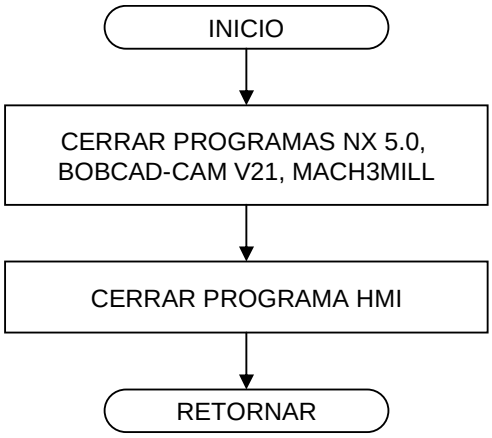


Figura 3.34 Objeto SALIR

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

Se realizaron varias pruebas para verificar el correcto funcionamiento de cada una de las partes del sistema.

4.1 CONTADOR INCREMENTAL / DECREMENTAL

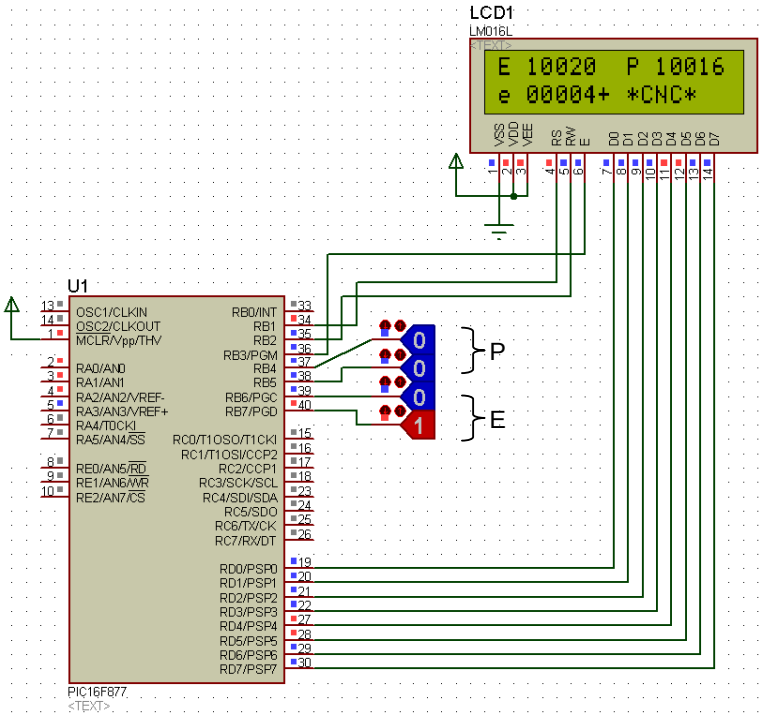


Figura 4.1 Sistema microprocesado para contador incremental / decremental

Se desarrolló digitalmente en el programa “ISIS 6 Professional” un sistema microprocesado para manejar correctamente un encoder incremental óptico (el cual fue simulado por interruptores lógicos); este consta básicamente de un microcontrolador PIC 16F877, un LCD 16x2 y los interruptores lógicos; lo principal fue desarrollar el código (lenguaje ensamblador, programa MPLAB) para obtener un contador incremental / decremental en función al sentido de giro del encoder

(secuencia de formas de onda cuadrada en las líneas A, B simuladas por los interruptores lógicos) y mostrar esa información en el LCD, se optó por utilizarlo ya que puede mostrar información de hasta 16 dígitos decimales por línea, como se puede ver en la Figura 4.1, el LCD muestra información de los pulsos proporcionados por el encoder (E), información de los pulsos provenientes de una PC (P) y la diferencia entre ellos (e). Una vez depurado el programa se obtuvo lo que se requería dos contadores incrementales / decrementales de alta velocidad para encoder incremental bidireccional (E) y PC (P). El diseño final del sistema no contiene el manejo del LCD ya que se lo utilizó para propósitos de prueba.

4.2 CONTROL EN LAZO ABIERTO DE UN MOTOR DE PASOS

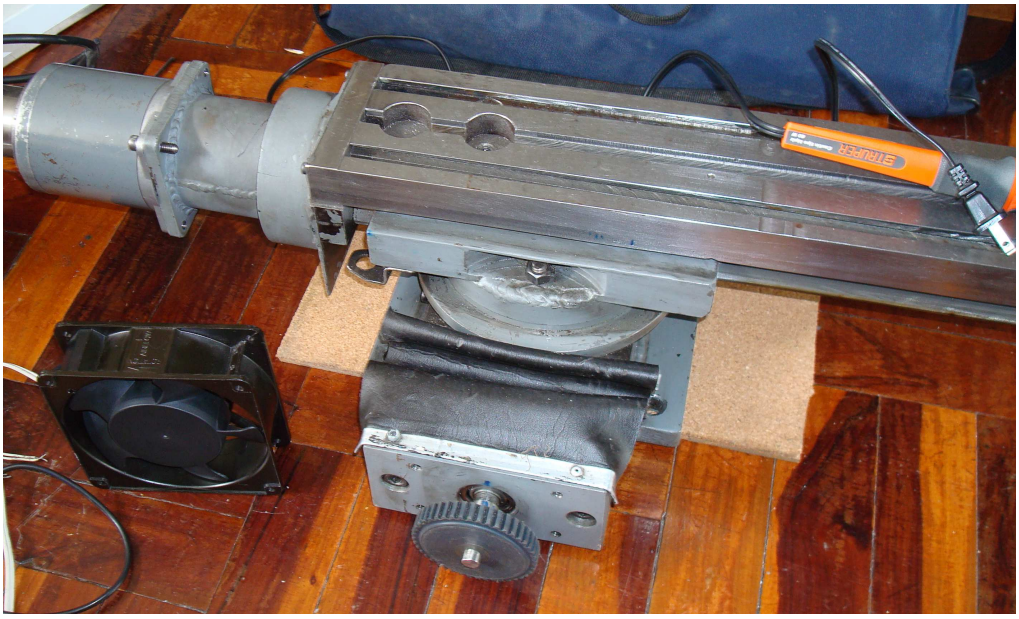


Figura 4.2 Prueba de motor de pasos en lazo abierto

La siguiente prueba que se realizó fue el manejo del motor de pasos en lazo abierto, para analizar su comportamiento montado en la mesa X de la máquina; un control básico de este tipo de motores es utilizar pasos completos, esto quiere decir que el motor gira un paso (cierta cantidad de grados) cada vez que se excita una de sus bobinas en un orden especifico. El motor que se utilizó es de 2º por paso, esto quiere decir que se requiere 180 pasos para girar una vuelta completa,

por lo que cuando el motor gire lentamente va ser notable los saltos que da entre paso y paso, lo que se pudo comprobar con un instrumento de medida llamado PALPADOR, en el cual se visualizó los saltos que da, produciendo vibración, la cual es transmitida a la pieza mecanizada ocasionando errores de fabricación, incluso el daño de la herramienta de corte.

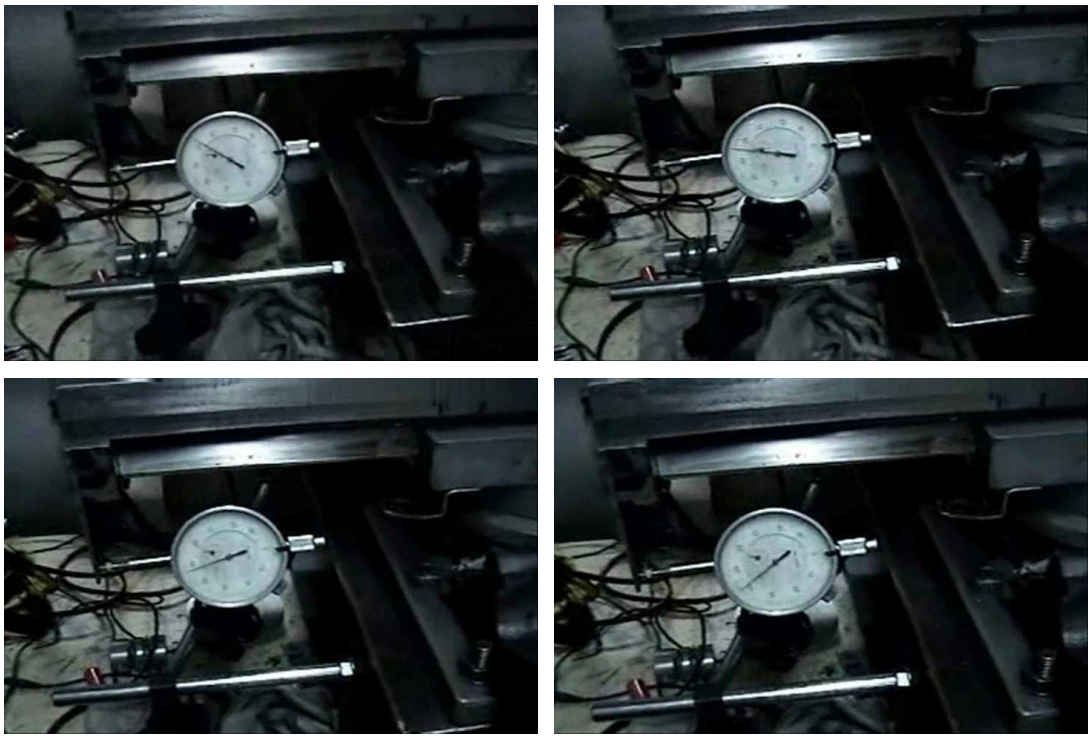


Figura 4.3 Saltos producidos por motor de pasos y visualizados en palpador

Como se puede apreciar la cantidad de pasos por vuelta del motor es reducido frente a la cantidad que proporciona el encoder (400 pulsos por vuelta), a parte que esto es un problema en cuanto a vibración mecánica, también es un problema en cuanto a precisión. Por estos motivos se optó por realizar el control con MICRO PASOS para velocidades relativamente bajas y MEDIOS PASOS para las altas, de esta manera se obtuvo como mínimo la resolución que proporciona el ENCODER. Existen algunas ventajas de utilizar MICRO PASOS siendo la principal la reducción de las vibraciones mecánicas a velocidades bajas, además de ganar resolución, pero se pierde cierta cantidad de torque.

4.3 CONTROL EN LAZO CERRADO

Figura 4.4 Desplazamiento del eje X en lazo cerrado

La próxima prueba realizada fue cerrar el lazo de control de posición, es decir que se integró en un solo programa la parte del manejo de los micro pasos con el procesamiento de la información del encoder, además se agregó el procesamiento de la información proveniente de la PC como señal de referencia de posición.

De las pruebas realizadas se obtuvo la Tabla 4.1 de valores de retardo los cuales generan un pequeño atraso entre estados (micro pasos) para dar una rampa de aceleración y desaceleración en todo el rango de velocidad, requerido por los elementos mecánicos de la máquina, además se encontró el punto en el cual los micro pasos desaparecen, esto quiere decir que desde este punto hacia mayor velocidad solo existe control por medios pasos y pasos completos, este punto crítico permite dividir al programa de control de posición en dos partes, para optimizar las líneas de código a ejecutar.

Tabla 4.1 Valores de los registros RET1 y RET2 para generar retardo en función al valor del registro ERROR_L

ERROR_L	RET1	RET2	ERROR_L	RET1	RET2
0	255	216	64	3	242
1	255	99	65	3	238
2	255	64	66	11	63
3	254	47	67	5	138
4	220	43	68	5	136
5	250	31	69	5	134
6	221	30	70	252	12
7	122	48	71	250	12
8	250	20	72	248	12
9	248	18	73	247	12
10	251	16	74	245	12
11	244	15	75	244	12
12	50	72	76	243	12
13	40	84	77	240	12
14	13	244	78	238	12
15	13	228	79	236	12
16	11	254	80	235	12
17	11	239	81	234	12
18	11	227	82	232	12
19	11	215	83	230	12
20	11	205	84	228	12
21	12	179	85	228	12
22	11	187	86	228	12
23	11	179	87	228	12
24	13	145	88	228	12
25	11	165	89	228	12
26	11	159	90	228	12
27	11	153	91	226	12
28	15	108	92	225	12
29	17	92	93	224	12
30	11	138	94	222	12
31	17	86	95	220	12
32	27	52	96	218	12
33	33	41	97	216	12
34	70	18	98	214	12
35	72	17	99	212	12
36	74	16	100	210	12
37	5	248	101	208	12
38	5	242	102	206	12
39	5	236	103	204	12
40	5	230	104	202	12
41	5	225	105	200	12
42	5	219	106	200	12
43	5	214	107	200	12
44	9	116	108	200	12
45	5	205	109	200	12
46	6	167	110	200	12
47	5	196	111	200	12

48	5	192	112	198	12
49	6	157	113	196	12
50	8	115	114	194	12
51	5	181	115	192	12
52	4	222	116	190	12
53	4	218	117	188	12
54	5	171	118	186	12
55	5	168	119	184	12
56	5	165	120	182	12
57	5	162	121	180	12
58	8	99	122	180	12
59	4	196	123	180	12
60	5	154	124	180	12
61	4	190	125	180	12
62	4	187	126	178	12
63	5	147	127	176	12
ERROR_L	RET1	RET2	ERROR_L	RET1	RET2
128	174	12	192	88	12
129	172	12	193	88	12
130	170	12	194	88	12
131	168	12	195	86	12
132	166	12	196	84	12
133	164	12	197	82	12
134	164	12	198	82	12
135	164	12	199	82	12
136	164	12	200	80	12
137	164	12	201	78	12
138	162	12	202	76	12
139	160	12	203	74	12
140	158	12	204	74	12
141	156	12	205	74	12
142	154	12	206	72	12
143	152	12	207	70	12
144	150	12	208	68	12
145	150	12	209	68	12
146	150	12	210	66	12
147	150	12	211	64	12
148	150	12	212	64	12
149	148	12	213	62	12
150	146	12	214	60	12
151	144	12	215	60	12
152	142	12	216	58	12
153	140	12	217	56	12
154	138	12	218	56	12
155	136	12	219	54	12
156	136	12	220	52	12
157	136	12	221	52	12
158	136	12	222	50	12
159	134	12	223	48	12
160	132	12	224	48	12
161	130	12	225	46	12
162	128	12	226	45	12
163	126	12	227	44	12

164	124	12	228	43	12
165	124	12	229	41	12
166	124	12	230	40	12
167	124	12	231	39	12
168	122	12	232	37	12
169	120	12	233	36	12
170	118	12	234	35	12
171	116	12	235	33	12
172	114	12	236	32	12
173	114	12	237	30	12
174	114	12	238	29	12
175	114	12	239	28	12
176	112	12	240	27	12
177	110	12	241	25	12
178	108	12	242	24	12
179	106	12	243	23	12
180	104	12	244	21	12
181	104	12	245	20	12
182	104	12	246	19	12
183	102	12	247	16	13
184	100	12	248	15	13
185	98	12	249	14	13
186	96	12	250	11	15
187	96	12	251	10	15
188	96	12	252	9	15
189	94	12	253	7	17
190	92	12	254	6	17
191	90	12			

4.4 SISTEMA MICROPROCESADO

Se probó el sistema microprocesado encargado de la visualización y de limitar la corriente que circula a través del motor de pasos, así como la comunicación unidireccional entre estos microprocesadores, en definitiva se comprobó el sistema en conjunto PC – CONTROLADOR – AMPLIFICADOR – MOTOR – MÁQUINA, encontrándose pequeños defectos en cuanto a circuitería que fueron solucionados como se puede ver en el capítulo DISEÑO DEL SISTEMA, así como pequeños errores de software (microcontroladores) que también fueron depurados.

Una vez ajustados los valores de corriente máxima para el motor de pasos y velocidades máximas en cuanto a la señal de referencia de la PC, el sistema funcionó correctamente.

Figura 4.5 Circuitos de control en etapa de pruebas

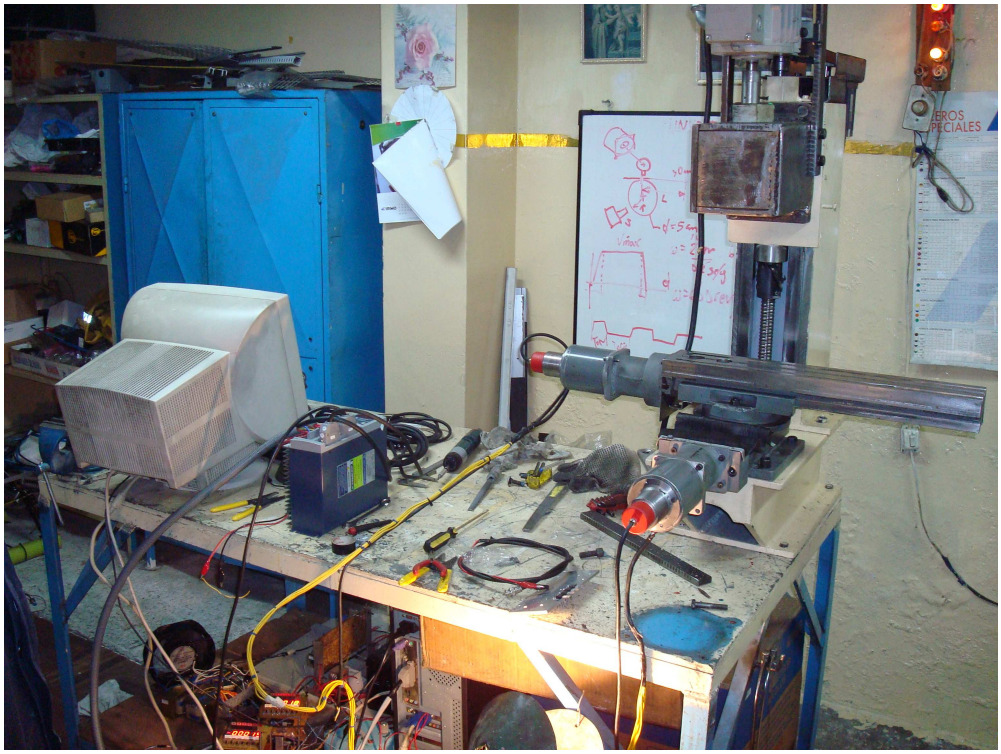


Figura 4.6 Servo controlador en etapa de pruebas

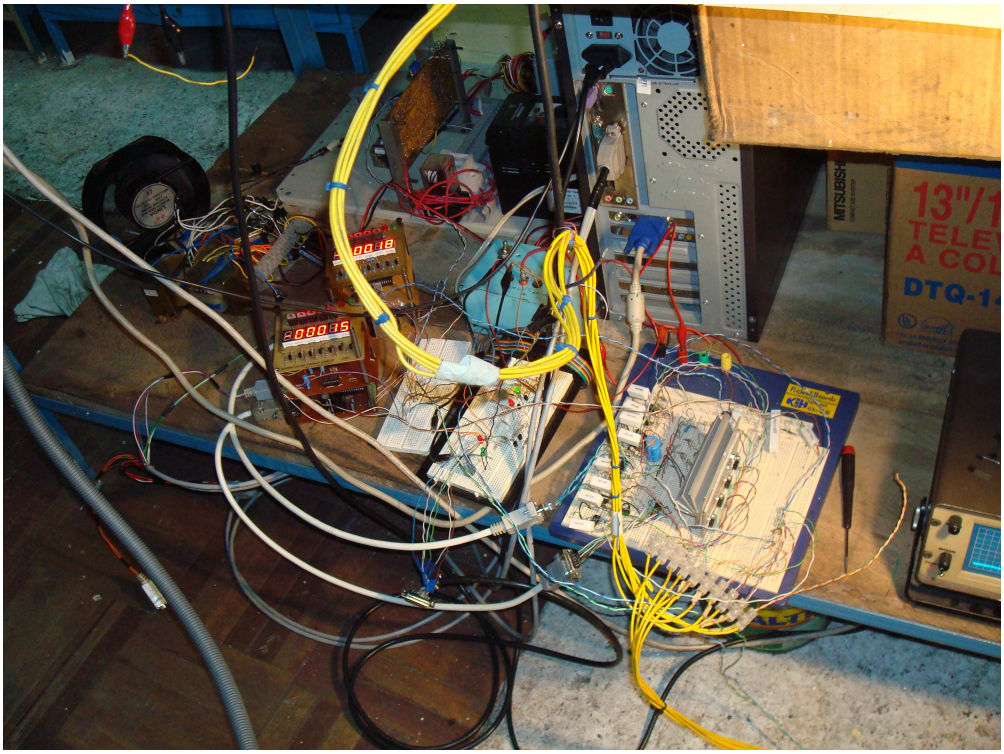


Figura 4.7 Circuitos de potencia en etapa de pruebas

Todas las pruebas mencionadas anteriormente se efectuaron con el programa “KCAM 4” el cual es limitado para aplicaciones que requieren mecanizados en tres dimensiones, por este motivo se lo cambió por el programa “MACH3 MILL”, pero surgió un problema en cuanto al tipo de señales que maneja el puerto paralelo, aunque son del mismo tipo es decir señales tipo pulso, se diferencian en que el programa “KCAM 4” proporciona una señal de control tipo pulso variable en frecuencia pero con una relación de trabajo fija del 50%; en cambio el programa “MACH3 MILL” proporciona una señal de control tipo pulso variable en frecuencia pero con un estado en alto o bajo fijo de 25us máximo, con esto se puede decir que la relación de trabajo es variable en función a la frecuencia; en base a las pruebas realizadas se comprobó que el sistema microprocesado de control de posición perdía información debido al tamaño de los pulsos, por este motivo se diseño un interfaz entre la PC y los circuitos de CONTROL, el cual sirve para ampliar el tiempo en estado alto o bajo que proporciona la PC que máximo es de 25us. Con esto se solucionó el problema de pérdida de pulsos.

4.5 SISTEMA FINAL

Terminadas las pruebas por partes, se comprobó el correcto funcionamiento del sistema total con dos ejemplos de mecanizado relativamente sencillos; uno consistió en mecanizar el nombre de la empresa en la cual se esta haciendo el proyecto “TechDesign”, sobre un bloque de aluminio, y la otra prueba consistió en mecanizar una semiesfera (vaciado) en otro bloque de aluminio. Para el mecanizado del texto se empleo el software BobCAD-CAM para diseñar y elaborar el código de control numérico; en cambio para la semiesfera se utilizó el software NX para diseñarla y obtener el código de control numérico. El software encargado de ejecutar la acción de control se llama MACH 3 MILL.

El procedimiento general que se utilizó para mecanizar el texto fue el siguiente:

En la pantalla HMI se seleccionó la opción “BobCAD-CAM”, para llamar a este programa como se puede apreciar en la Figura 4.8.

Figura 4.8 Pantalla HMI

En la pantalla del programa, en una nueva hoja de trabajo, se utilizó las herramientas para texto, con las que se ingresó el nombre de la empresa

(TechDesign) con un estilo de letra relativamente complejo para comprobar la versatilidad de la máquina

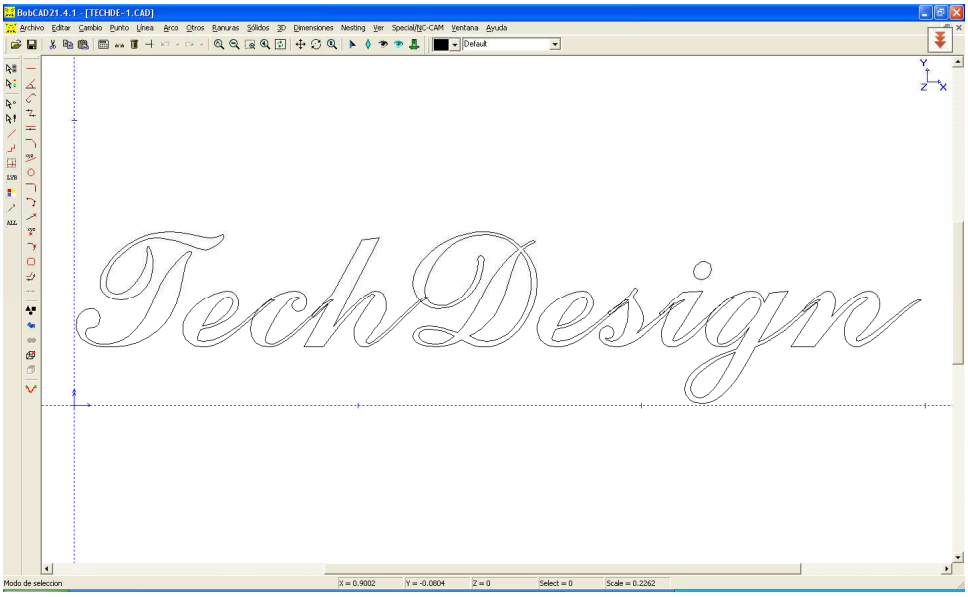


Figura 4.9 Pantalla principal programa BobCAD-CAM V21

A continuación se utiliza la herramienta para generar vectores, que conformarán las trayectorias de la herramienta de corte

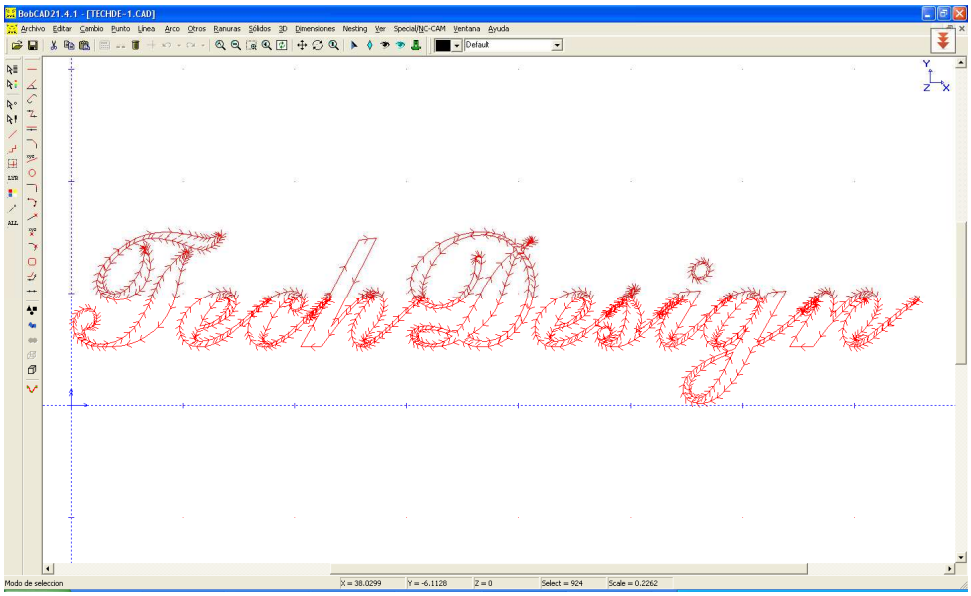


Figura 4.10 Generación de trayectorias

Para obtener el código de control numérico, se selecciona la opción “Insertar un objeto NC en el dibujo (Insert an NC-object into the drawing)”

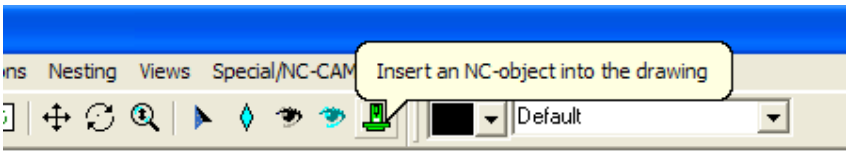


Figura 4.11 Herramienta “Insertar objeto NC“

En la ventana desplegada (Figura 4.12) se selecciona la opción “Mach 3 Mill”, ya que corresponde al programa CNC que se utiliza en el proyecto y presionar OK.

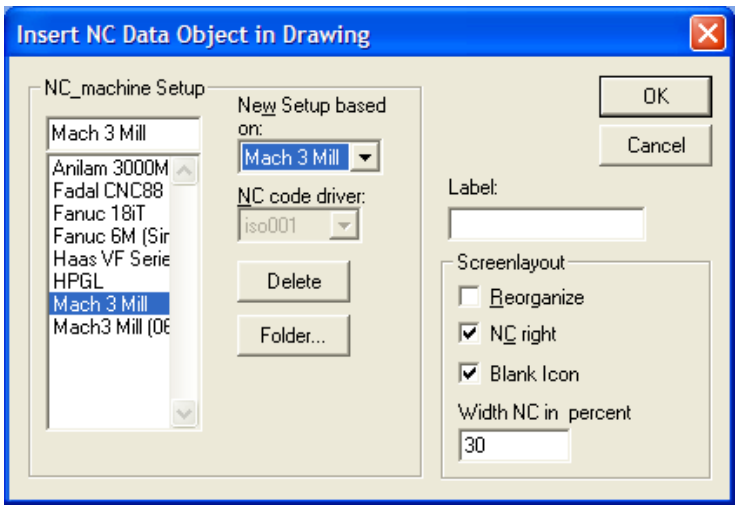


Figura 4.12 Opciones “Insertar objeto NC en dibujo“

En la nueva ventana (Figura 4.13) se selecciona la opción “Propiedades de profundidad de herramienta (Tool depth settings)“,

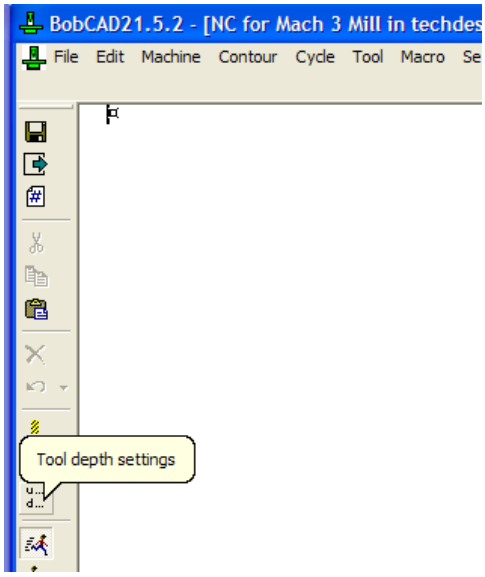


Figura 4.13 Ventana “NC for Mach 3 Mill”

A continuación se muestra otra ventana en la cual se configura los parámetros de corte como, Plano de seguridad (Rapid plane), Tope de material (Material top), Profundidad de corte total (Cutting depth), Profundidad máxima de cada pasada (Max. Depth each cut), Error máximo de interpolación para un arco 3D (Max. 3D-arc interpolation error), Velocidad de avance normal y de corte (Feed Normal, Plunge)

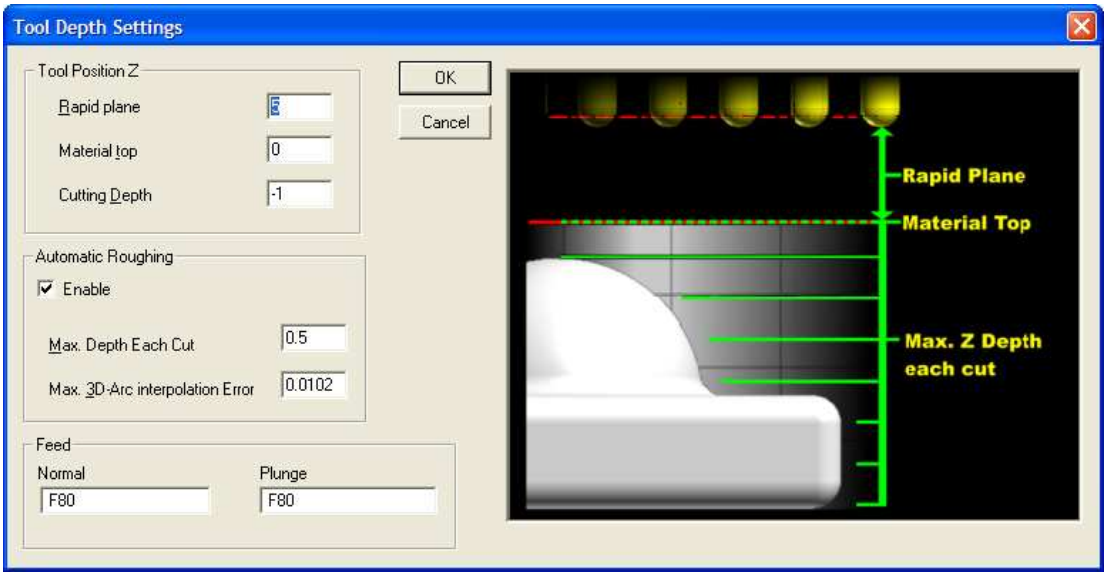


Figura 4.14 Ventana “Propiedades de profundidad de herramienta”

Una vez colocados los valores requeridos por el usuario (mostrados en la Figura 4.14), presionar OK y seleccionar la opción “Auto” del menú “Máquina (Machine)”

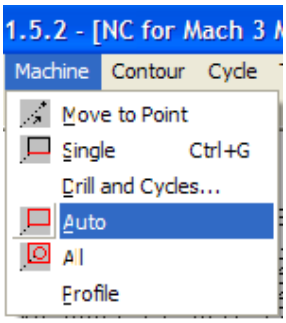


Figura 4.15 Opción “Auto”

Automáticamente se obtiene el código de control numérico, al cual se le agrega el encabezado y el final para encender/apagar el motor del husillo principal, además de ingresar el valor de su velocidad.

```
G90          ; se selecciona modo de distancia absoluta.
M05          ; se apaga el motor del husillo principal.
G04 P4       ; se ejecuta (G04) un tiempo de retardo (P4) de 4 segundos.
M03 S1500    ; se activa (M03) el motor del husillo principal a una velocidad
               (S1500) de 1500 rpm.
G04 P4       ; se ejecuta (G04) un tiempo de retardo (P4) de 4 segundos.
. . . . . .
. . . . . .
(Código CN generado automáticamente por el programa BobCAD-CAM V21)
. . . . . .
. . . . . .
G00 X0 Y0    ; se ejecuta el posicionamiento rápido al punto X0, Y0, pieza.
M05          ; se apaga el motor del husillo principal.
M30          ; se finaliza el programa y se retorna al inicio.
```

A continuación se graba el archivo obtenido y se regresa a la ventana HMI para llamar al programa Mach3Mill.

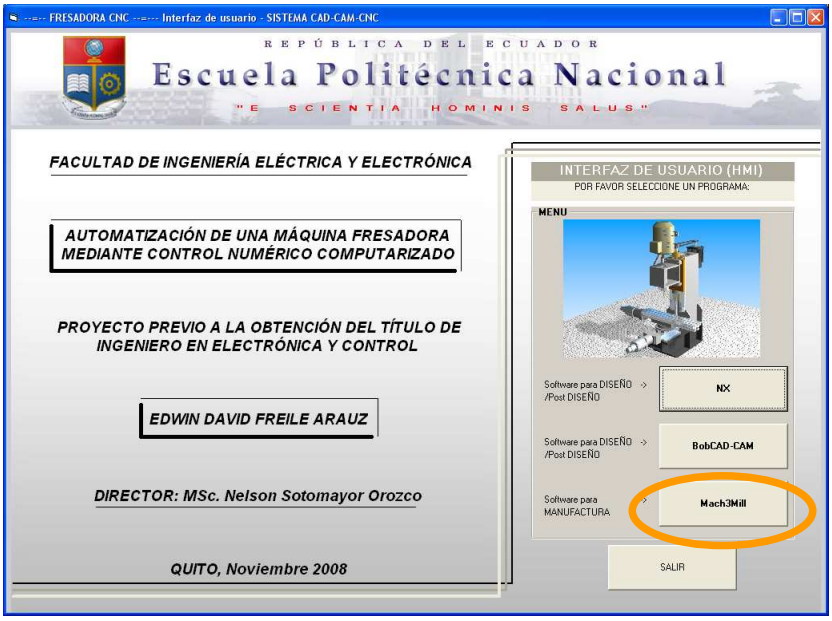


Figura 4.16 Pantalla HMI

En la pantalla del programa Mach3Mill se abre el archivo del código obtenido anteriormente, se fija físicamente el bloque de aluminio, se ajusta la posición cero de la máquina con los controles del programa y se inicia el proceso de mecanizado

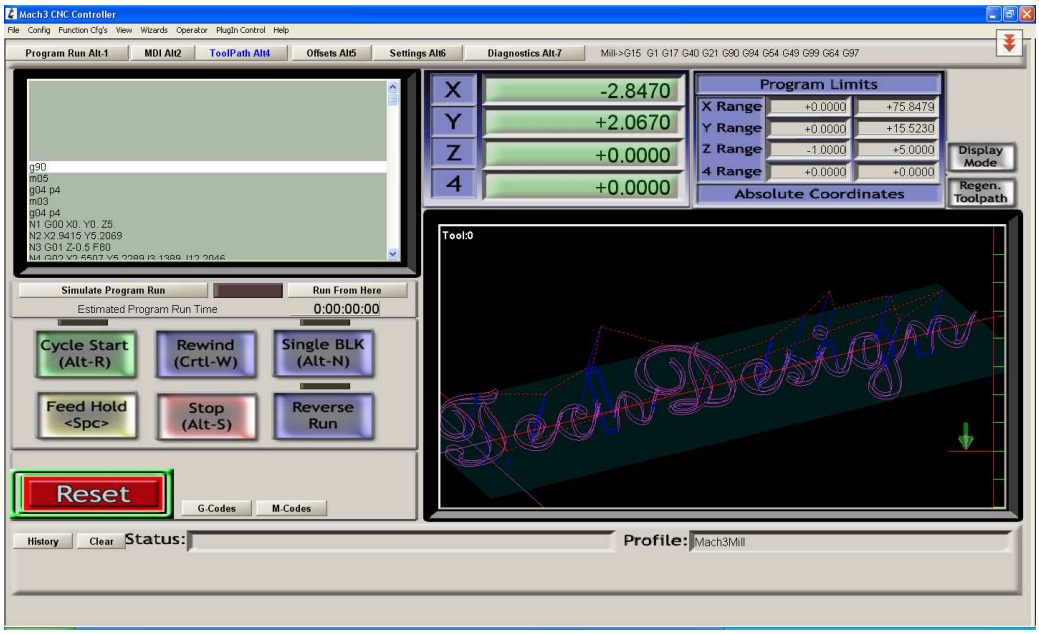


Figura 4.17 Pantalla ToolPath del programa Mach3Mill

Una vez terminado el proceso, se desmonta la pieza mecanizada y se observa el resultado

Figura 4.18 Texto mecanizado en bloque de aluminio

Como se puede apreciar el acabado del texto en la pieza es muy bueno, por lo que se puede decir que el sistema total funcionó correctamente.

Para la semiesfera se utilizó el siguiente procedimiento general:

En la pantalla HMI se seleccionó la opción “NX”, para llamar a este programa

Figura 4.19 Pantalla HMI

En la pantalla del programa, en el área de trabajo, se utilizó las herramientas para cuerpos sólidos, con las que se diseñó un vaciado semiesférico

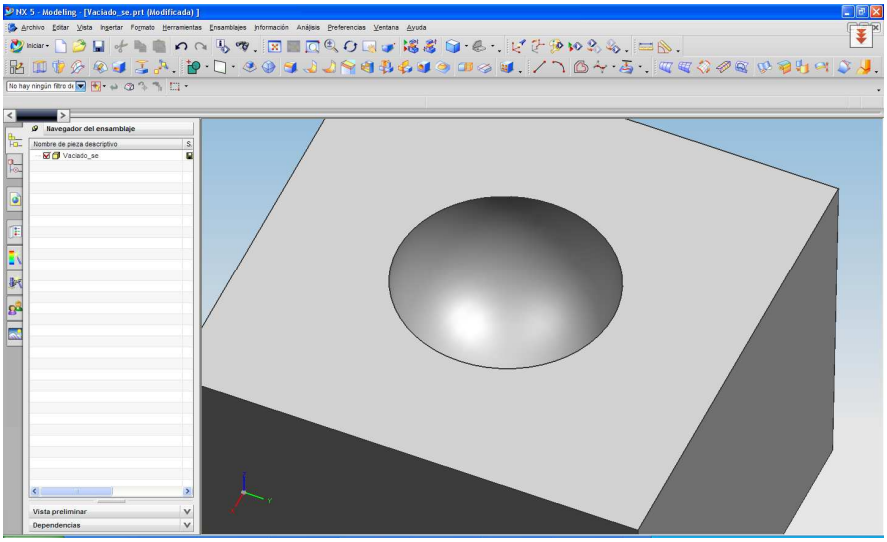


Figura 4.20 Vaciado semiesférico programa NX 5.0

Luego utilizando el módulo CAM de NX se genera las trayectorias de la herramienta, incluso se puede visualizar el tipo de acabado que se va a obtener

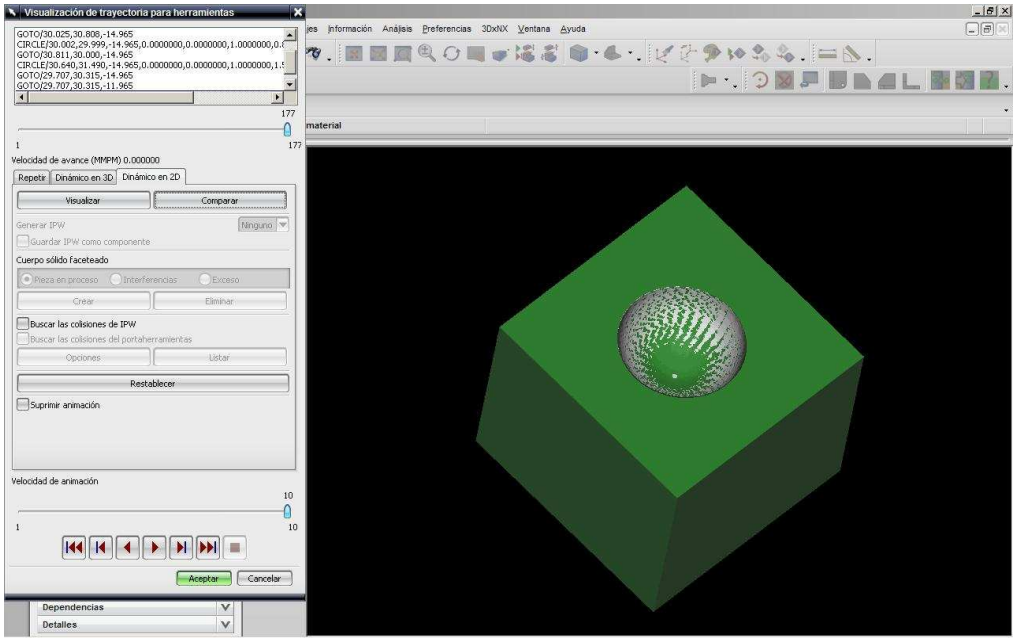


Figura 4.21 Tipo de acabado en programa NX 5.0

Para ello se debe configurar los parámetros de velocidades de avance y corte mostrados en la Figura 4.22

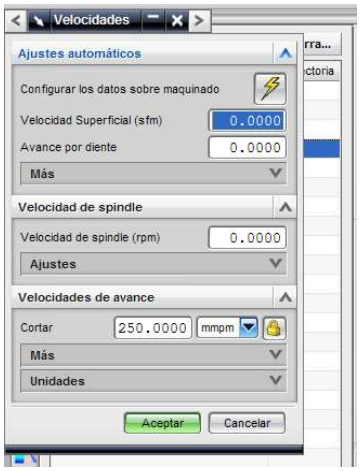


Figura 4.22 Opciones para velocidades

Así también algunos parámetros como niveles de corte, parámetros de corte, etc. Figura 4.23

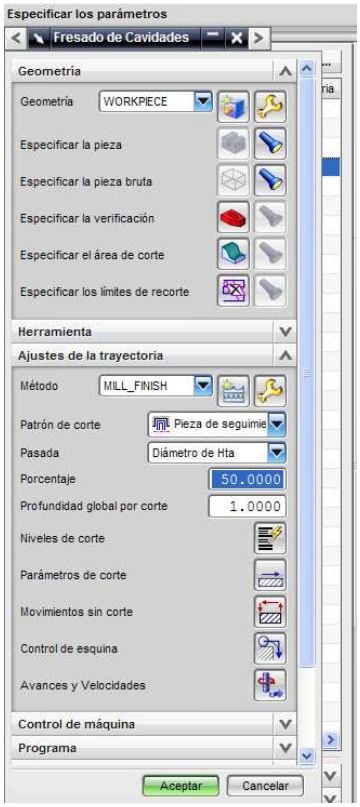


Figura 4.23 Opciones para mecanizado de cavidades

Luego seleccionar la herramienta “Posprocesar”

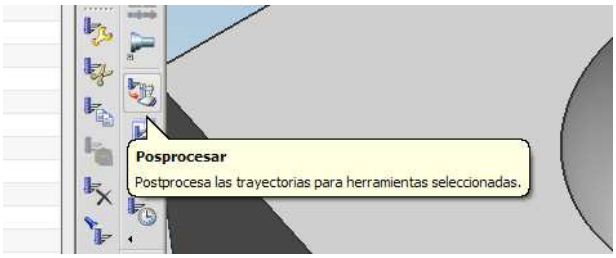


Figura 4.24 Herramienta Posprocesar

En la ventana desplegada Figura 4.25, se selecciona un posprocesador que sea compatible con el programa Mach3Mill

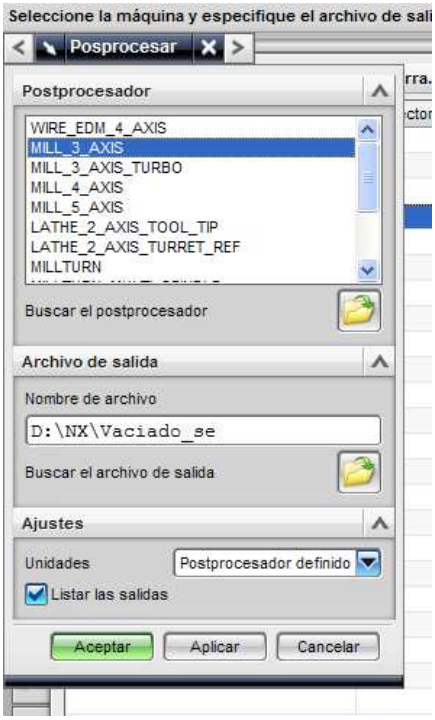


Figura 4.25 Ventana Posprocesar

Al presionar “Aceptar” el programa NX automáticamente genera el código de control numérico, adquiriendo dos archivos, uno para desbaste y otro para acabado fino.

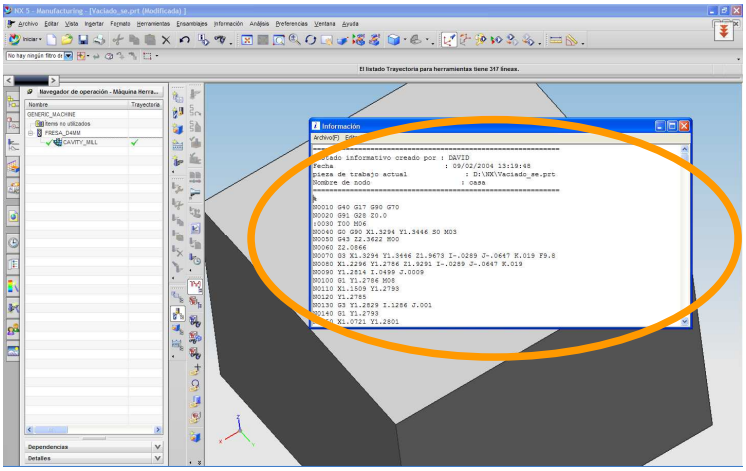


Figura 4.26 Código CNC generado

A continuación se regresa a la ventana HMI para llamar al programa Mach3Mill.

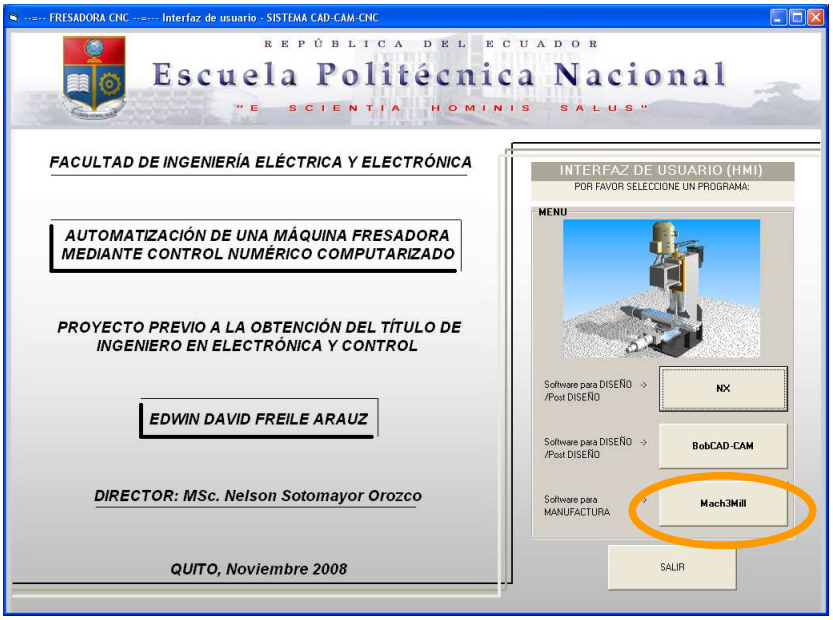


Figura 4.27 Pantalla HMI

En la ventana principal del programa Mach3Mill se abre los archivos de código obtenidos anteriormente, cabe recalcar que este mecanizado posee dos partes una de desbaste y otra de acabado fino, para los cual se fija físicamente el bloque de aluminio, se ajusta la posición cero de la máquina con los controles del programa e inicia el proceso de mecanizado

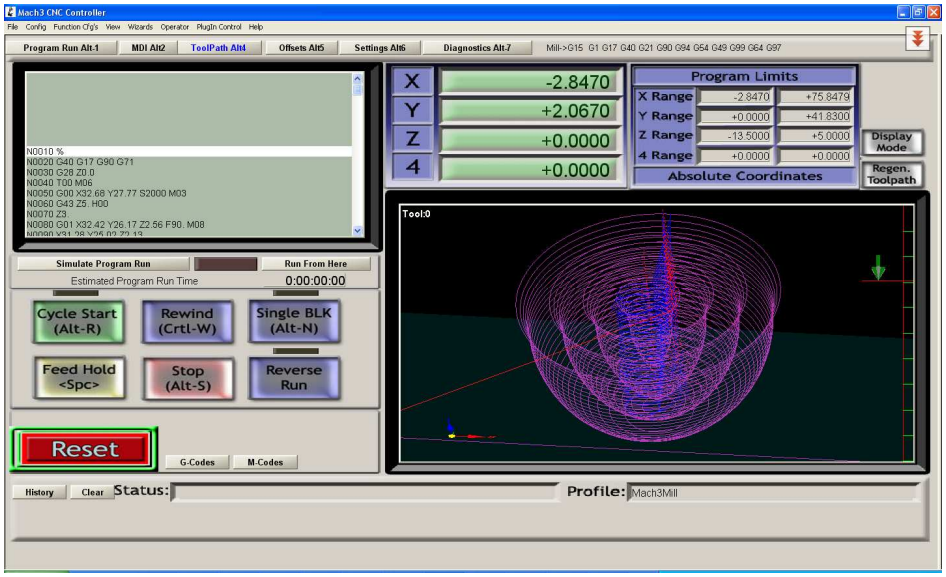


Figura 4.28 Pantalla ToolPath del programa Mach3Mill - Desbaste

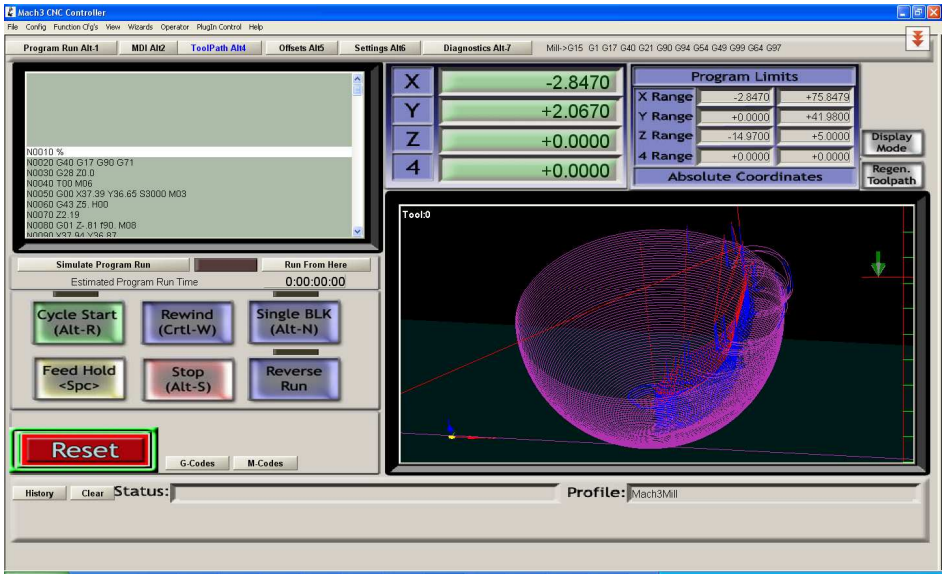


Figura 4.29 Pantalla ToolPath del programa Mach3Mill – Acabado fino

Al finalizar se desmonta el bloque mecanizado y se observa el resultado

Figura 4.30 Vaciado semiesférico, vista superior

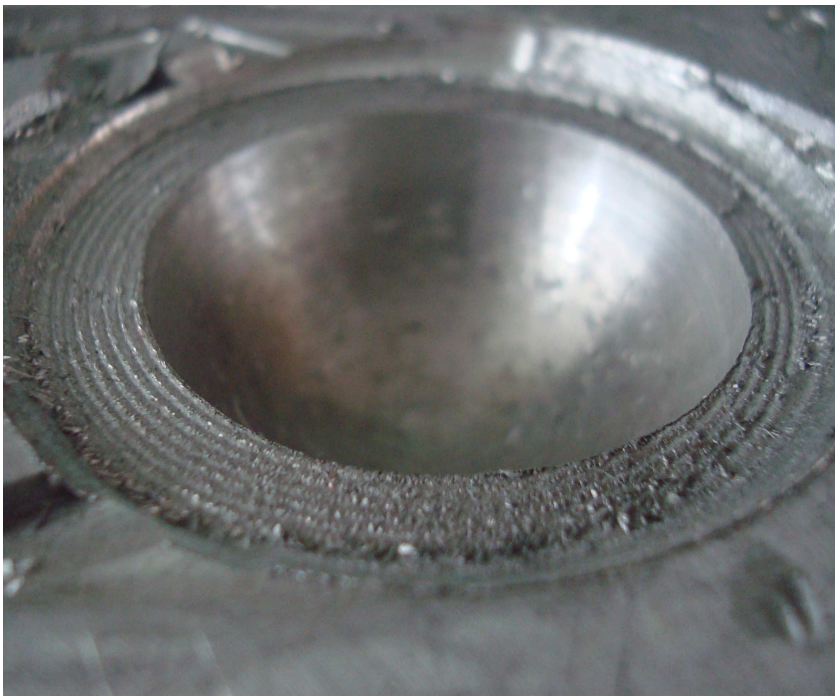


Figura 4.31 Vaciado semiesférico

Como se puede apreciar el acabado final del vaciado semiesférico es bastante bueno, con esto se afirma que la máquina trabaja correctamente.

4.6 LISTADO DE ELEMENTOS Y COSTO

Las Tablas 4.2 a 4.9 contienen un listado de los elementos empleados en el sistema y su costo en dólares americanos.

Tabla 4.2 Listado de elementos, PLACAS DE CONTROL.

PLACAS DE CONTROL		
Elemento	Cantidad	Valor
R 4,7K 1/2W	8	0,72
R 330Ω 1/2W	4	0,36
R 680Ω 1/2W	30	2,69
R 39Ω 1/2W	16	1,43
R 2,7K 1/2W	8	0,72
R 2,2K 1/2W	4	0,36
R 22K 1/2W	4	0,36
R 1K 1/2W	2	0,18
R 100K 1/2W	2	0,18
R 470Ω 1/2W	4	0,36
R 10K 1/2W	4	0,36
R 27K 1/2W	6	0,54
POT 10K	2	3,36
C 0,1uF	12	1,34
C 22pF	8	0,81
C Electrolítico 1uF 10V	2	0,13
C Electrolítico 1uF 16V	6	0,40
C Electrolítico 100uF 16V	4	0,27
C Electrolítico 1000uF 10V	2	2,17
Cristal 20MHz	4	5,38
Microcontrolador PIC16F877A	4	40,10
LED Verde	2	0,20
LED Rojo	2	0,20
Bornera 3 líneas	4	4,03
Bornera 2 líneas	6	3,02
Pulsante	2	0,52
Sócalo 40 Pines	4	8,06
Sócalo 14 Pines	4	2,69
Transistor TIP127	10	7,84
Transistor 2N3904	18	1,41
Display 7 SEG Ánodo Común	12	16,13
CI TL084	2	1,46
CI 74LS07	2	1,79

CI 7805	2	1,01
DB9 Hembra	4	2,02
Jumper 3 líneas	2	0,78
Impresión PLACA	6	201,60
SUBTOTAL		314,97

Tabla 4.3 Listado de elementos, PLACAS DE POTENCIA.

PLACAS DE POTENCIA		
Elemento	Cantidad	Valor
R 0,1Ω 10W	2	2,28
R 220Ω 5W	8	9,14
R 330Ω 1/2W	16	1,43
R 560Ω 1/2W	8	0,72
C 0,1uF	14	1,57
C Electrolítico 100uF 10V	2	0,13
C Electrolítico 100uF 16V	2	0,13
Bornera 3 líneas	2	2,02
Bornera 2 líneas	12	6,05
DB9 Hembra	2	1,01
CI 7408	2	2,02
CI 7407	2	1,79
CI NTE3087	8	132,61
Transistor 2N3904	8	0,63
Transistor NTE66	8	84,40
Sócalo 14 Pines	4	2,69
Sócalo 8 Pines	8	0,36
Impresión PLACA	2	78,40
SUBTOTAL		327,38

Tabla 4.4 Listado de elementos, PLACA INTERFAZ 1.

PLACA INTERFAZ 1		
Elemento	Cantidad	Valor
Bornera 3 líneas	2	2,02
Bornera 2 líneas	4	2,02
DB9 Hembra	1	0,50
C Electrolítico 100uF 16V	1	0,07
C Electrolítico 100uF 10V	1	0,07
C Electrolítico 1uF 10V	2	0,13
C 0,1uF	5	0,56
C 0,01uF	4	0,31
R 10K 1/2W	6	0,54
R 1K 1/2W	6	0,54
R 560Ω 1/2W	2	0,18

R 2,7K 1/2W	6	0,54
R 680Ω 1/2W	2	0,18
R 330Ω 1/2W	4	0,36
R 100Ω 1/2W	2	0,18
R 56K 1/2W	2	0,18
R 470Ω 1/2W	2	0,18
Transistor 2N3904	6	0,47
CI 7407	1	0,90
CI LM555	2	0,90
CI 4N25	2	1,57
LED Rojo	2	0,20
Sócalo 14 Pines	1	0,67
Sócalo 8 Pines	2	0,09
Sócalo 6 Pines	2	0,09
Impresión PLACA	1	44,80
SUBTOTAL		58,23

Tabla 4.5 Listado de elementos, PLACA INTERFAZ 2.

PLACA INTERFAZ 2		
Elemento	Cantidad	Valor
DB9 Hembra	1	0,50
Bornera 3 líneas	3	3,02
Bornera 2 líneas	10	5,04
R 1,2K 1/2W	4	0,36
R 330Ω 1/2W	11	0,99
R 100Ω 1/2W	4	0,36
R 1,8K 1/2W	3	0,27
R 56K 1/2W	4	0,36
R 4,7K 1/2W	1	0,09
R 1K 1/2W	8	0,72
R 100K 1/2W	1	0,09
R 5,6K 1/2W	1	0,09
R 3,3K 1/2W	3	0,27
R 27K 1/2W	3	0,27
R 10K 1/2W	3	0,27
R 22K 1/2W	1	0,09
R 470K 1/2W	1	0,09
C Electrolítico 1uF 16V	1	0,07
C Electrolítico 22uF 16V	1	0,07
C Electrolítico 10uF 16V	1	0,07
C Electrolítico 100uF 10V	1	0,07
C Electrolítico 100uF 16V	1	0,07
C Electrolítico 1000uF 16V	1	1,09
C 0,1uF	4	0,45
C 1nF	1	0,04
C 10nF	1	0,08
LED Verde	7	0,71

LED Rojo	1	0,10
LED Amarillo	1	0,10
Diodo 1N4004	3	0,17
Transistor 2N3904	13	1,02
Transistor 2N3906	1	0,08
CI 7407	1	0,90
CI 4N25	7	5,49
CI 7432	2	1,12
CI LM555	1	0,45
CI 7805	1	0,50
Sócalo 14 Pines	3	2,02
Sócalo 8 Pines	1	0,04
Sócalo 6 Pines	7	0,31
Relé 12V	3	8,40
Impresión PLACA	1	56,00
SUBTOTAL		92,27

Tabla 4.6 Listado de elementos, FUENTE Motores Paso a Paso.

FUENTE Motores Paso a Paso		
Elemento	Cantidad	Valor
Transformador 110VAC - 12 0 12VAC 4A	3	50,40
Puente Rectificador ECG5322	1	8,96
C Electrolítico 10000uF 35V	6	6,72
Fusible 12A	1	0,28
Porta Fusible 12A	1	1,12
Bornera 10 líneas	1	1,12
SUBTOTAL		68,60

Tabla 4.7 Listado de elementos, RELÉS DE CONTROL.

RELÉS DE CONTROL		
Elemento	Cantidad	Valor
Fusible 0,5A	2	0,56
Fusible 15A	4	1,12
Interruptor Manual por giro con fijación	1	1,62
Interruptor Manual por presión con fijación	1	2,69
Interruptor Seccionador Tripolar	1	14,56
Relé 24V para riel DIN	5	67,20
Porta fusible para riel DIN	6	26,88
SUBTOTAL		114,63

Tabla 4.8 Listado de elementos, OTROS.

OTROS		
Elemento	Cantidad	Valor
Conector DB9 Macho c/tapa	8	6,81
Conector DB25 Macho c/tapa	1	0,90
Bornera 10 líneas	3	3,36
Ventilador 110VAC Pequeño	4	80,64
Ventilador 110VAC Grande	2	100,80
Variador de Frecuancia EATON MVX9000	1	201,60
Servo Drive GSK DA98D	1	1.008,00
Fuente Switching para PC	2	38,01
Fuente Regulada CALEX 24VDC 240mA	1	134,40
Motor Paso a Paso	2	179,20
Servo Motor 110SJT-M020E	1	1.008,00
Motor de Inducción	1	218,40
Sensor inductivo	1	134,40
Encoder rotativo	2	403,20
Computador	1	784,00
Gabinete	1	60,48
Cables, conectores, rieles, regletas, etc		54,70
Conjunto mecánico		4.480,00
Licencia MACH3	1	280,00
Ingeniería		3.360,00
SUBTOTAL		12.536,90

Tabla 4.9 Listado de elementos, SISTEMA CNC.

SISTEMA CNC	
Subtotal	Valor
PLACAS DE CONTROL	314,97
PLACAS DE POTENCIA	327,38
PLACA INTERFAZ 1	58,23
PLACA INTERFAZ 2	92,27
FUENTE MOTORES PASO A PASO	68,60
RELES DE CONTROL	114,63
OTROS	12.536,90
TOTAL	13.512,97

Como se puede apreciar el costo de la máquina fresadora CNC es de 13512,97 dólares americanos, este valor es relativamente bajo en comparación al costo de maquinaria importada de similares características.

Figura 4.32 Sistema CNC

La Figura 4.32, muestra a la máquina fresadora CNC en su presentación final.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Desarrollar una máquina herramienta de control numérico computarizado en el Ecuador es factible y a un menor costo que una máquina CNC extranjera, debido a que la mano de obra en nuestro país es más económica.

- Utilizar motores paso a paso con control convencional en este tipo de maquinaria no es recomendable debido a los problemas de vibraciones mecánicas causados por los saltos entre pasos, por lo que se requiere de un tipo de control que permita suavizar el movimiento del motor, aunque esto implique pérdida de torque.

- Emplear servo motores trifásicos es la mejor opción para controlar los ejes de movimiento en las maquinas CNC debido a sus características de control y desempeño en cuanto a torque y velocidad; las máquinas CNC modernas utilizan este tipo de tecnología.

- Usar un computador como elemento central de control y diseño es una gran ventaja ya que posee la flexibilidad de ejecutar cualquier programa que sea compatible con el sistema operativo, a diferencia de los fabricantes de este tipo de maquinaria que utilizan sus propios controladores y software al cual el acceso es restringido.

- Dentro de la variedad de software para diseño y manufactura asistida por computador, NX de SIEMENS PLM y sus módulos para CAD, CAM, son los más versátiles, ya que poseen grandes prestaciones en cuanto a tiempo de

diseño y alta precisión en cuanto a la información de las características geométricas de la pieza a mecanizar.

- Automatizar una máquina fresadora convencional empleando controladores y actuadores que responden al control numérico computarizado agrega una infinidad de posibilidades de mecanizado para la máquina, ya que estas dependen de la habilidad del diseñador, operario y del software CAD/CAM/CNC que se utilice.

5.2 RECOMENDACIONES

- Como recomendación se debe tener conocimiento de todas las partes que conforman la máquina, desde el software de diseño hasta su infraestructura, para sacarle el máximo provecho; incluso para dar mantenimiento en caso de que así lo requiera.

- Para aumentar el grado de automatización de este proyecto se recomendaría implementar en un futuro el sistema automático para cambio de herramientas, el sistema automático de refrigeración y lubricación de corte, así como el sistema automático de sujeción.

- Es recomendable utilizar servo motores AC en lugar de motores paso a paso, en la mayoría de sistemas de control de posición, debido a las características de alta precisión y confiabilidad que presentan estos dispositivos, ya que no tienen problemas de pérdida de pulsos, generación de vibraciones mecánicas, etc.

- Sería recomendable que la Escuela Politécnica Nacional de importancia a este tipo de tecnologías, ya que la industria ecuatoriana requiere ser competitiva a nivel mundial y para esto es necesario conocer e implementar tecnología moderna que permitirá mejorar la calidad y tiempo de producción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Correa, Julio, “CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO”, Escuela Técnica Nuestra Señora de la Guardia, 1997, http://html.rincondelvago.com/control-numerico.html

[2] Maquinados Especiales S.A., “CONTROL NUMÉRICO”, 2005, http://hermosillovirtual.com/maquinados/default.htm

[3] Kleinbauer, John, “UNIQUE PLANS FOR HOBBYISTS”, 2004, http://www.crankorgan.com/brute.htm

[4] GSK CNC Equipment CO. LTD., “XJK6325A/6330”, 2009, http://canwong.diytrade.com/sdp/417113/4/cp-2296882.html

[5] Godinez, Claudia, “CONTROL NUMÉRICO CN”, 2002, http://html.rincondelvago.com/control-numerico-computarizado.html

[6] COPRE, “FRESADORA CNC RH20”, 2007, http://www.copre.co.cr/maquinaria/cnc/fresadoras/docs/92-93.pdf

[7] Wikimedia Foundation Inc., “FRESA (HERRAMIENTA)”, 2009, http://es.wikipedia.org/wiki/Fresa_(herramienta)

[8] Larburu, Nicolás, “Máquinas prontuario”, Paraninfo, Madrid, 1989.

[9] Storr, Wayne, “ELECTRONICS TUTORIAL ABOUT POSITIONAL SENSORS”, 1998, http://www.electronics-tutorials.ws/io/io_2.html

[10] Wikimedia Foundation Inc., “SENSOR INDUCTIVO”, 2008, http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_inductivo

[11] SILGE ELECTRONICA S.A., “ENCODER INCREMENTAL DESCRIPCION GENERAL”, 2000, http://bc.inter.edu/facultad/arincon/encoderIncrementales.pdf

[12] TodoRobot, “TUTORIAL SOBRE MOTORES PASO A PASO (STEPPER MOTORS)”, 2000, http://www.todorobot.com.ar/informacion/tutorial%20stepper/stepper-tutorial.htm

[13] Fredrik Eriksson, “STEEPER MOTOR BASICS”, 1998, http://www.solarbotics.net/library/pdflib/pdf/motorbas.pdf

[14] Herman, Bruce, “SUPER MR-J2“, Mitsubishi Electric Corporation, 2003, http://global.mitsubishielectric.com/

[15] GSK CNC Equipment CO. LTD., “DA98D DIGITAL AC SERVO DRIVE UNIT USER´S MANUAL V5.00”, 2007, http://www.gsk.com.cn

[16] Universidad Politécnica de Valencia, “MOTORES”, 2003, http://www.upv.es/electrica/automatica/motores/motorSection.jpg

[17] Wikimedia Foundation Inc., “DIODO EMISOR DE LUZ”, 2009, http://es.wikipedia.org/wiki/Diodo_LED

[18] Eaton Electrical Inc., “MVX9000 AF DRIVES USER MANUAL”, 2006, www.eatonelectrical.com

[19] Som, Guillermo, “EJECUTAR UN ACCESO DIRECTO DESDE VB6 CON SHELLEXECUTE”, 2007, http://www.elguille.info/vb/API/ejecutar_acceso_directo.aspx

[20] Simple Machines LLC, “¿COMO CERRAR PROGRAMAS .EXE DESDE VISUAL BASIC 6.0?”, 2006, http://foro.portalhacker.net/index.php/topic,51934.0.html

ANEXO A

MANUAL DE USUARIO

A.1 Partes constitutivas

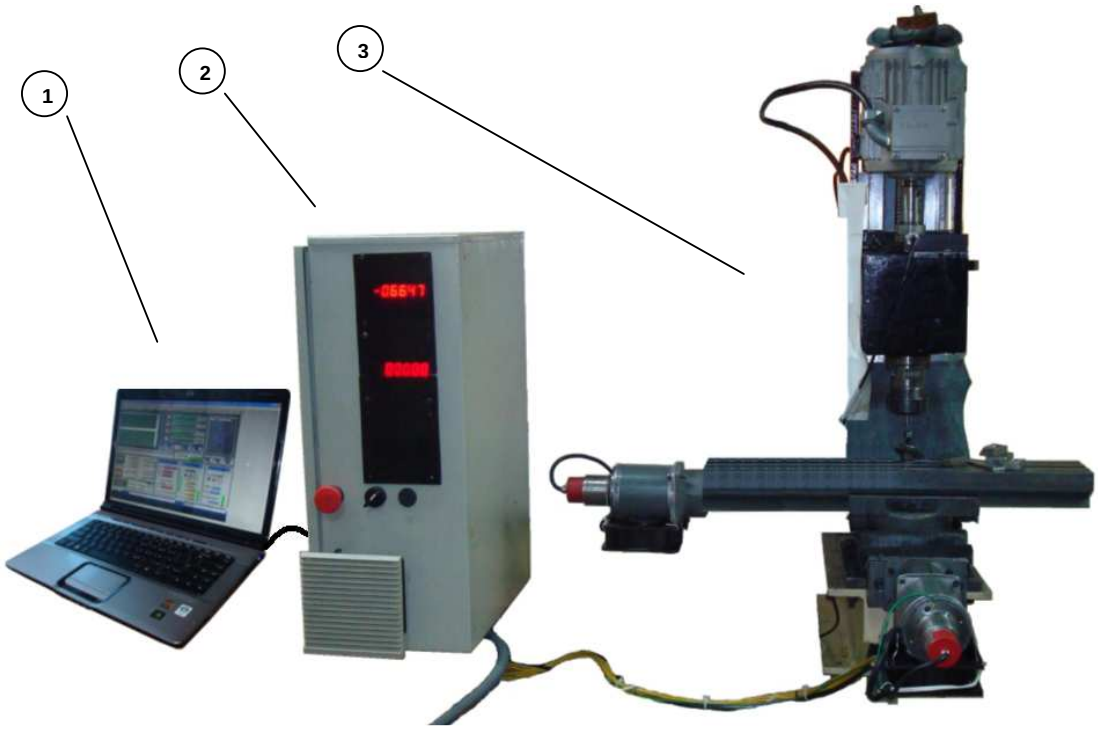


Figura A1.1 Sistema CNC

A nivel macro, las partes constitutivas del sistema CNC son:

① Computador personal
② Sistema interfaz entre computador y máquina
③ Máquina fresadora

El computador personal debe reunir algunas características mínimas de sistema para que los programas de DISEÑO / POST-DISEÑO / CONTROL trabajen sin problema; ya que el sistema CNC de este proyecto de titulación está optimizado para trabajar con los programas BobCAD-CAM V21, NX 5.0 y Mach3 Mill, las características mínimas de mayor importancia para la PC son:

- Sistema operativo Microsoft Windows 2000 Professional Edition, Windows XP Professional Edition.
- Procesador Intel Pentium III o Pentium 4, 2.4 GHz.
- 512 MB de memoria RAM.
- Espacio en el disco duro 4 GB.
- Se requiere de unidad DVD-ROM para la instalación de los programas.
- Se recomienda trabajar con un monitor de 17 pulgadas.
- Tarjeta gráfica no integrada con acelerador 3D Open GL a una resolución de 1024x768, 128 MB VRAM.
- Pórtico paralelo disponible.

El sistema interfaz entre computador y máquina de operación sencilla tiene como componentes un interruptor de encendido (color negro), un interruptor paro de emergencia (color rojo) y visualizadores para las coordenadas absolutas X, Y.

La máquina fresadora posee un sistema de acoplamiento para la herramienta de corte de fácil montaje/desmontaje, dos mordazas de sujeción; el desplazamiento máximo de los ejes principales de movimiento es X = 200 mm, Y = 60 mm y Z = 200 mm; la velocidad del husillo principal varía desde 0 – 2500 rpm.

A.2 Operación del sistema

Para mecanizar cualquier pieza se debe seguir los siguientes pasos:

1. Enceder el computador, esperar hasta que la pantalla principal del software HMI este presente, ingresar al programa Mach3 Mill.

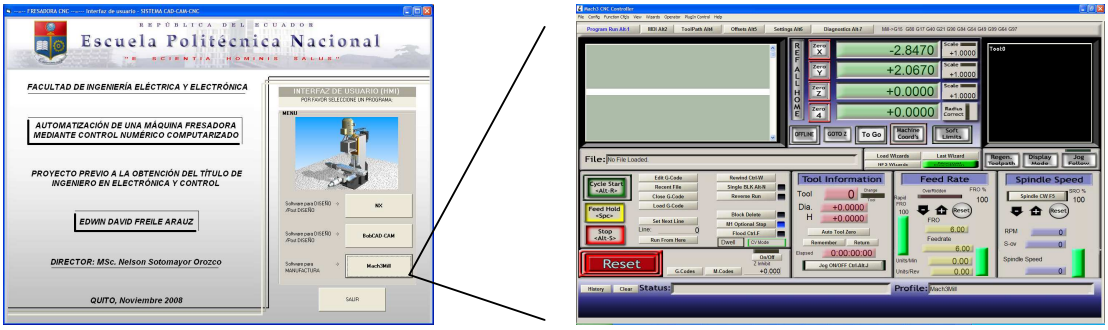


Figura A1.2 Software HMI – Mach3 Mill

2. Enceder el sistema interfaz y el interruptor principal tripolar.

3. Colocar la herramienta adecuada en el porta herramienta según las especificaciones de diseño y post diseño.

4. Colocar la materia prima ① (bloque de aluminio, madera) sobre la mesa de trabajo ② y sujetarla con las mordazas ③, esto se debe hacer considerando el punto cero de la máquina.

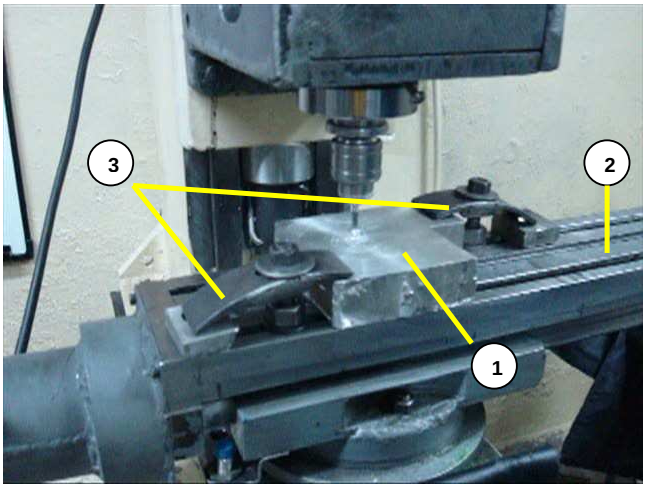


Figura A1.3 Ubicación de pieza en mesa de trabajo

5. Utilizar el programa Mach3 Mill para ajustar el punto de coordenadas X, Y, Z, 0, 0, 0 para iniciar el proceso de mecanizado, puede ser utilizando las teclas de JOG. Normalmente se toma el punto de coordenadas X, Y, 0, 0 de la máquina y se ajusta vía software el punto Z, 0, dependiendo de las

dimensiones físicas del bloque. Al efectuar esta operación se puede cambiar las coordenadas que se muestran en pantalla y en el visualizador, esto no es de mucha importancia, lo que se debe asegurar es el punto 0,0,0, físico para poder mecanizar

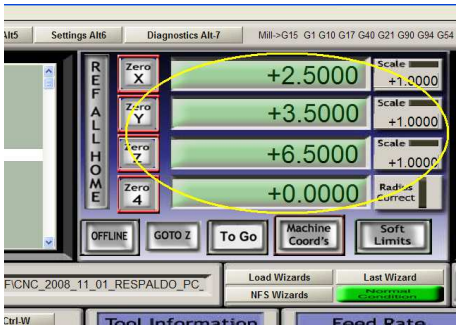


Figura A1.4 Valor de coordenadas XYZ Mach3 Mill

Una vez hallado este punto encerar el valor que se muestra en pantalla, presionando los botones

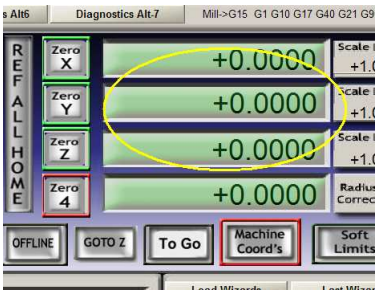


Figura A1.5 Valor de coordenadas XYZ Mach3 Mill – Punto X,Y,Z,0,0,0, máquina

6. Abrir el archivo de código G obtenido previamente en los programas de DISEÑO/POST-DISEÑO.

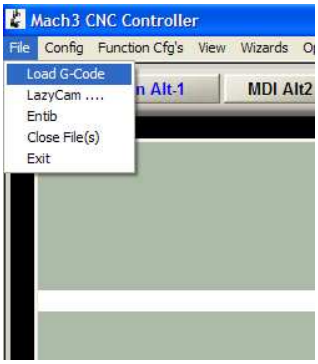


Figura A1.6 Menú Archivo Mach3 Mill

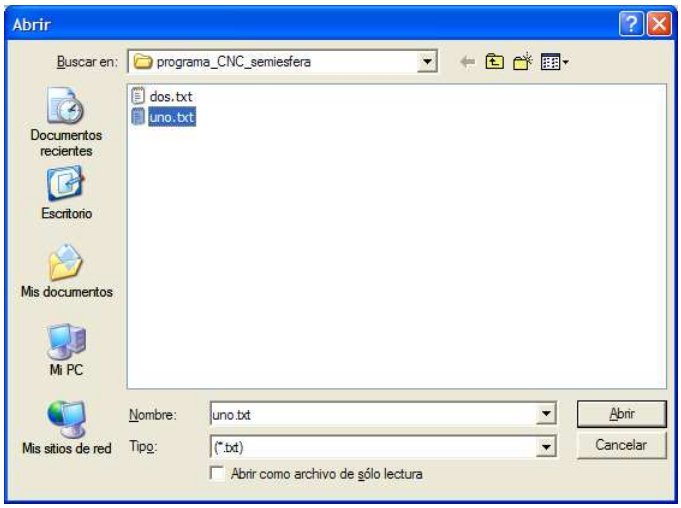


Figura A1.7 Abrir archivo Mach3 Mill

7. Revisar que el archivo se haya cargado correctamente, para ello se muestra en pantalla a lado izquierdo el listado del código G, a lado derecho el dibujo de las trayectorias a seguir por la herramienta y en la parte inferior (STATUS) no debe mostrar mensaje de error. Si todo el sistema esta correcto y el botón “RESET” no parpadea, se puede iniciar el proceso de mecanizado con el botón “Cycle Start”.

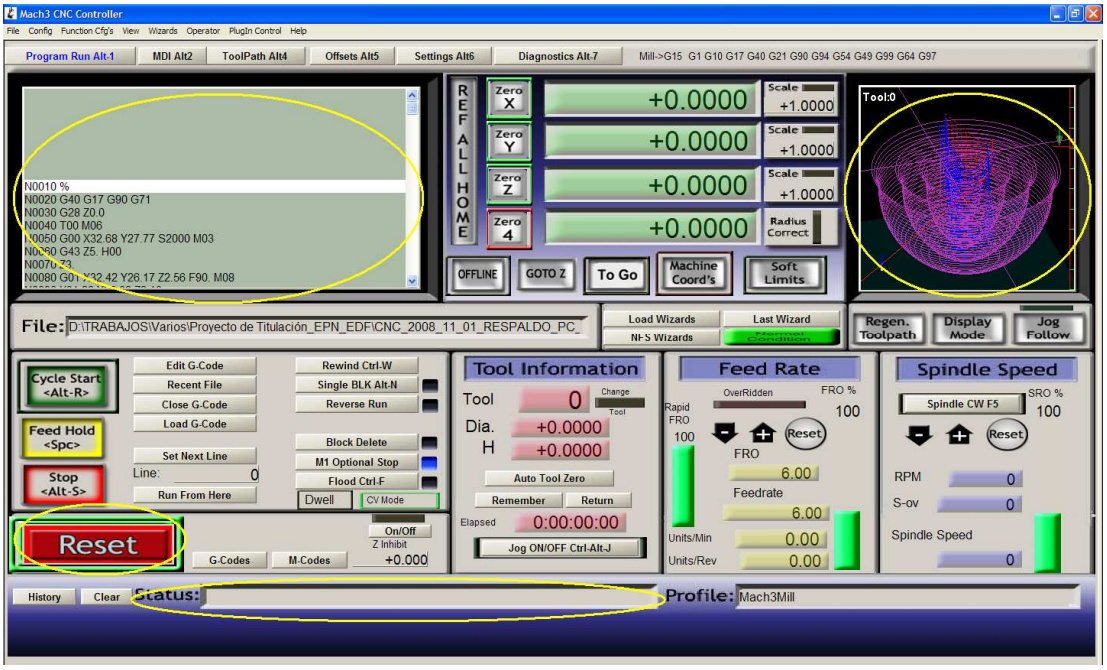


Figura A1.8 Pantalla principal Mach3 Mill

A.3 Posibles situaciones de error

Si existe algún tipo de error como sobre corriente, exceso de error de posición en el sistema interfaz PC – Máquina, se tiene visualizadores tipo LED que muestran este tipo de fallo (LED verde para error de exceso de posición y LED rojo para error de sobre corriente), además en la pantalla del computador se activa el botón de paro de emergencia (RESET) que desactiva inmediatamente el sistema. Las posibles causas de estos errores pueden ser valores excesivos de velocidad de avance, velocidad de corte, profundidad de corte. Para lo cual se recomendaría en la etapa de DISEÑO / POST-DISEÑO disminuir estos valores.

Si se presenta algún tipo de error en el programa Mach3 Mill (STATUS), se debe leer el mensaje mostrado para efectuar alguna corrección en la etapa de DISEÑO/POST-DISEÑO, o alguna configuración en el mismo programa de control.

ANEXO B

HOJAS DE DATOS DE ELEMENTOS ESPECIALES

Agilent 4N25
Phototransistor Optocoupler
General Purpose Type
Data Sheet

Description
The 4N25 is an optocoupler for general purpose applications. It contains a light emitting diode optically coupled to a phototransistor. It is packaged in a 6-pin DIP package and available in wide-lead spacing option and lead bend SMD option. Response time, t_r, is typically 3 µs and minimum CTR is 20% at input current of 10 mA.

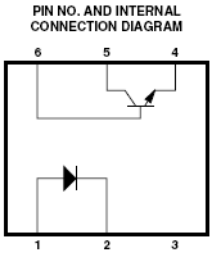
Ordering Information
Specify part number followed by Option Number (if desired).

4N25-XXXE
- Lead Free
- Option Number

000 = No Options
060 = IEC/EN/DIN EN 60747-5-2 Option
W00 = 0.4" Lead Spacing Option
300 = Lead Bend SMD Option
500 = Tape and Reel Packaging Option

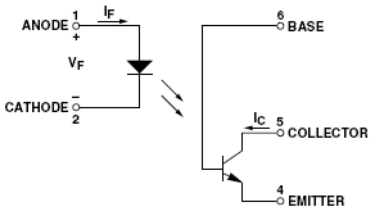
Features
- Response time (t_r: typ., 3 µs at V_{CE} = 10 V, I_C = 2 mA, R_L = 100 Ω)
- Current Transfer Ratio (CTR: min. 20% at I_F = 10 mA, V_{CE} = 10 V)
- Input-output isolation voltage (V_{iso} = 2500 Vrms)
- Dual-in-line package
- UL approved
- CSA approved
- IEC/EN/DIN EN 60747-5-2 approved
- Options available:
  - Leads with 0.4" (10.16 mm) spacing (W00)
  - Leads bends for surface mounting (300)
  - Tape and reel for SMD (500)
  - IEC/EN/DIN EN 60747-5-2 approvals (060)

Functional Diagram



1. ANODE
2. CATHODE
3. NC
4. EMITTER
5. COLLECTOR
6. BASE

Schematic



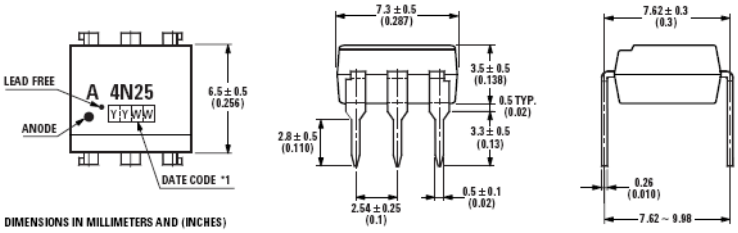
Applications
- I/O interfaces for computers
- System appliances, measuring instruments
- Signal transmission between circuits of different potentials and impedances

CAUTION: It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of this component to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

Agilent Technologies

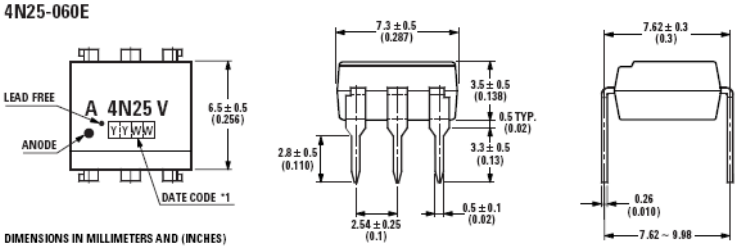
Package Outline Drawings

4N25-000E



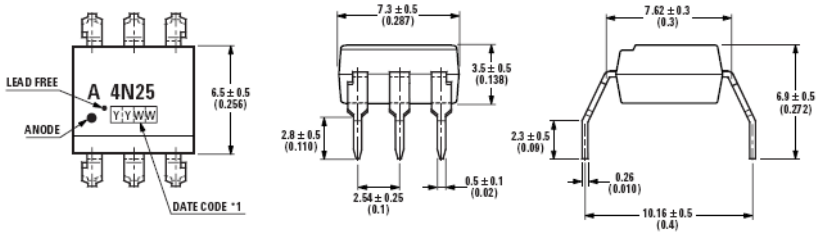
DIMENSIONS IN MILLIMETERS AND (INCHES)

4N25-060E



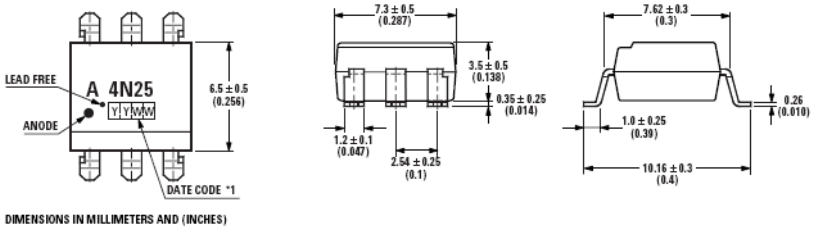
DIMENSIONS IN MILLIMETERS AND (INCHES)

4N25-W00E



DIMENSIONS IN MILLIMETERS AND (INCHES)

4N25-300E

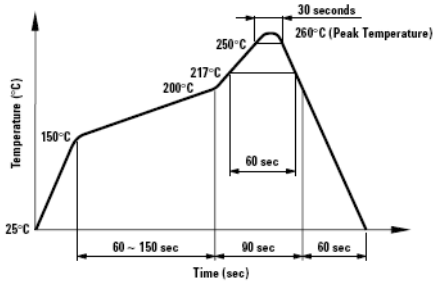


DIMENSIONS IN MILLIMETERS AND (INCHES)

Solder Reflow Temperature Profile

1) One-time soldering reflow is recommended within the condition of temperature and time profile shown at right.

2) When using another soldering method such as infrared ray lamp, the temperature may rise partially in the mold of the device. Keep the temperature on the package of the device within the condition of (1) above.



Absolute Maximum Ratings

Storage Temperature, T_S	–55°C to +150°C
Operating Temperature, T_A	–55°C to +100°C
Lead Solder Temperature, max. (1.6 mm below seating plane)	260°C for 10 s
Average Forward Current, I_F	80 mA
Reverse Input Voltage, V_R	6 V
Input Power Dissipation, P_I	150 mW
Collector Current, I_C	100 mA
Collector-Emitter Voltage, V_{CEO}	30 V
Emitter-Collector Voltage, V_{ECO}	7 V
Collector-Base Voltage, V_{CBO}	70 V
Collector Power Dissipation	150 mW
Total Power Dissipation	250 mW
Isolation Voltage, V_{iso} (AC for 1 minute, R.H. = 40 ~ 60%)	2500 Vrms

Electrical Specifications (T_A = 25°C)

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
Forward Voltage	V_F	–	1.2	1.5	V	I_F = 10 mA
Reverse Current	I_R	–	–	10	µA	V_R = 4 V
Terminal Capacitance	C_t	–	50	–	pF	V = 0, f = 1 KHz
Collector Dark Current	I_{CEO}	–	–	50	nA	V_{CE} = 10 V, I_F = 0
Collector-Emitter Breakdown Voltage	BV_{CEO}	30	–	–	V	I_C = 0.1 mA, I_F = 0
Emitter-Collector Breakdown Voltage	BV_{ECO}	7	–	–	V	I_E = 10 µA, I_F = 0
Collector-Base Breakdown Voltage	BV_{CBO}	70	–	–	V	I_C = 0.1 mA, I_F = 0
Collector Current	I_C	2	–	–	mA	I_F = 10 mA
*Current Transfer Ratio	CTR	20	–	–	%	V_{CE} = 10 V
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	–	0.1	0.5	V	I_F = 50 mA, I_C = 2 mA
Response Time (Rise)	t_r	–	3	–	µs	V_{CE} = 10 V, I_C = 2 mA
Response Time (Fall)	t_f	–	3	–	µs	R_L = 100 Ω
Isolation Resistance	R_{iso}	5×10^{10}	1×10^{11}	–	Ω	DC 500 V 40 ~ 60% R.H.
Floating Capacitance	C_f	–	1	–	pF	V = 0, f = 1 MHz

$$* \text{CTR} = \frac{I_C}{I_F} \times 100\%$$

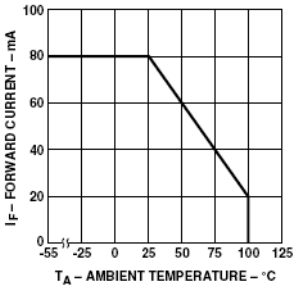


Figure 1. Forward current vs. temperature.

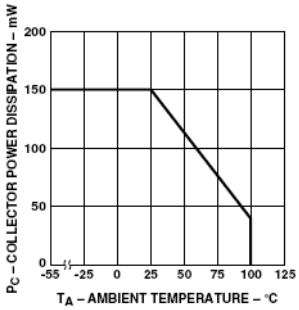


Figure 2. Collector power dissipation vs. temperature.

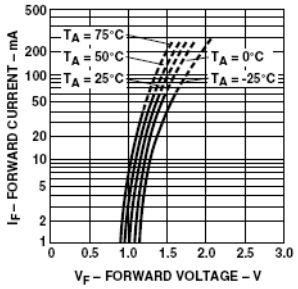


Figure 3. Forward current vs. forward voltage.

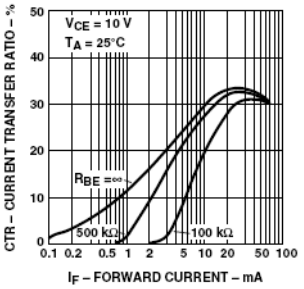


Figure 4. Current transfer ratio vs. forward current.

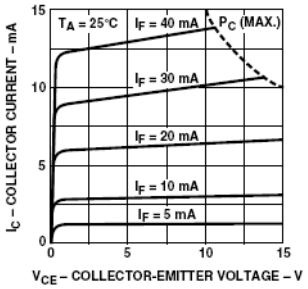


Figure 5. Collector current vs. collector-emitter voltage.

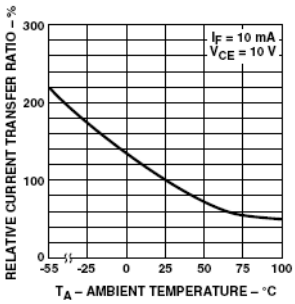


Figure 6. Relative current transfer ratio vs. temperature.

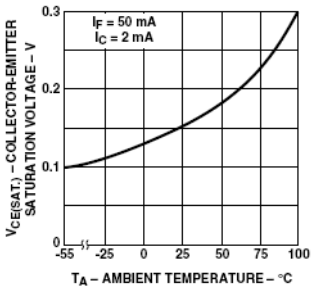


Figure 7. Collector-emitter saturation voltage vs. temperature.

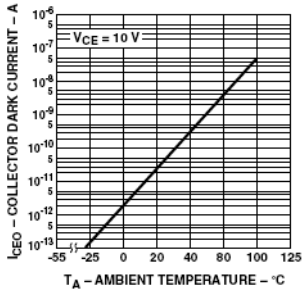


Figure 8. Collector dark current vs. temperature.

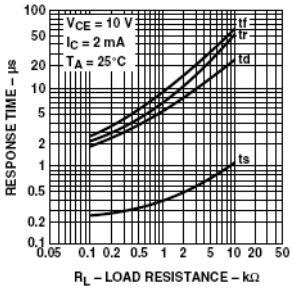


Figure 9. Response time vs. load resistance.

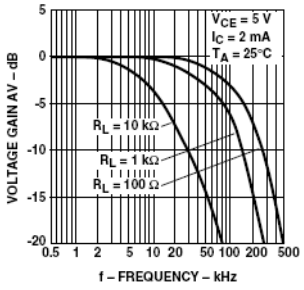


Figure 10. Frequency response.

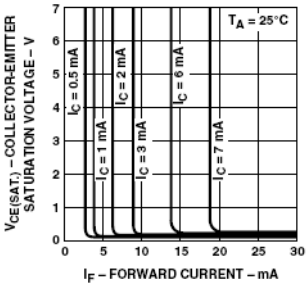
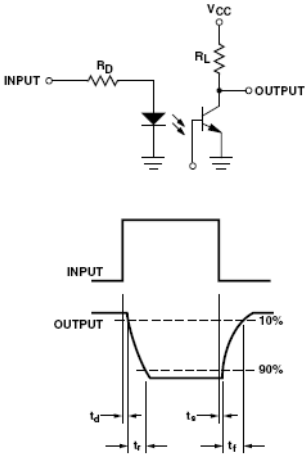
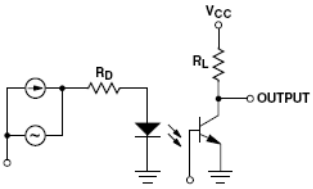


Figure 11. Collector-emitter saturation voltage vs. forward current.

Test Circuit for Response Time



Test Circuit for Frequency Response



www.agilent.com/semiconductors
For product information and a complete list of distributors, please go to our web site.

For technical assistance call:

Americas/Canada: +1 (800) 235-0312 or (916) 788-6763

Europe: +49 (0) 6441 92460

China: 10800 650 0017

Hong Kong: (+65) 6756 2394

India, Australia, New Zealand: (+65) 6755 1939

Japan: (+81 3) 3335-8152 (Domestic/International), or 0120-61-1280 (Domestic Only)

Korea: (+65) 6755 1989

Singapore, Malaysia, Vietnam, Thailand, Philippines, Indonesia: (+65) 6755 2044

Taiwan: (+65) 6755 1843

Data subject to change.
Copyright © 2004 Agilent Technologies, Inc.
Obsoletes 5989-0292EN
November 3, 2004
5989-1733EN

Agilent Technologies

TOSHIBA PHOTOCOUPLER GaAs IRED & PHOTO-TRANSISTOR

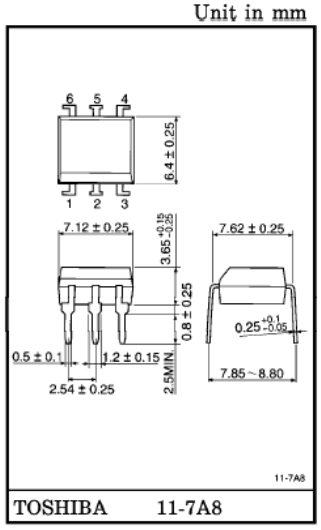
4N25(Short), 4N25A(Short), 4N26(Short), 4N27(Short), 4N28(Short)

AC LINE / DIGITAL LOGIC ISOLATOR.
DIGITAL LOGIC / DIGITAL LOGIC ISOLATOR.
TELEPHONE LINE RECEIVER.
TWISTED PAIR LINE RECEIVER.
HIGH FREQUENCY POWER SUPPLY FEEDBACK CONTROL.
RELAY CONTACT MONITOR.

The TOSHIBA 4N25 (Short) through 4N28 (Short) consists of a gallium arsenide infrared emitting diode coupled with a silicon phototransistor in a dual in-line package.

- Switching Speeds : 3μs (Typ.)
- DC Current Transfer Ratio : 100% (Typ.)
- Isolation Resistance : $10^{11}\Omega$ (Min.)
- Isolation Voltage : 2500Vrms (Min.)
- UL Recognized : UL1577, File No. E67349

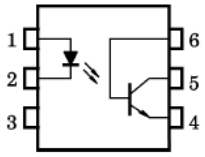
Unit in mm



TOSHIBA 11-7A8

Weight : 0.4g

PIN CONFIGURATIONS (Top view)



1 : ANODE
2 : CATHODE
3 : N.C.
4 : EMITTER
5 : COLLECTOR
6 : BASE

MAXIMUM RATINGS (Ta = 25°C)

	CHARACTERISTIC	SYMBOL	RATING	UNIT
LED	Forward Current (Continuous)	I_F	80	mA
	Forward Current Derating	ΔI_F / °C	1.07 (*)	mA / °C
	Peak Forward Current (Note 1)	I_{PF}	3	A
	Power Dissipation	P_D	150	mW
	Power Dissipation Derating	ΔP_D / °C	2.0 (*)	mW / °C
	Reverse Voltage	V_R	3	V
DETECTOR	Collector-Emitter Voltage	BV_{CEO}	30	V
	Collector-Base Voltage	BV_{CBO}	70	V
	Emitter-Collector Voltage	BV_{ECO}	7	V
	Collector Current (Continuous)	I_C	100	mA
	Power Dissipation	P_C	150	mW
	Power Dissipation Derating	ΔP_C / °C	2.0 (*)	mW / °C
COUPLED	Storage Temperature Range	T_{stg}	−55~150	°C
	Operating Temperature Range	T_{opr}	−55~100	°C
	Lead Soldering Temperature (10s)	T_{sol}	260	°C
	Total Package Power Dissipation	P_T	250	mW
	Total Package Power Dissipation Derating	ΔP_T / °C	3.3 (*)	mW / °C

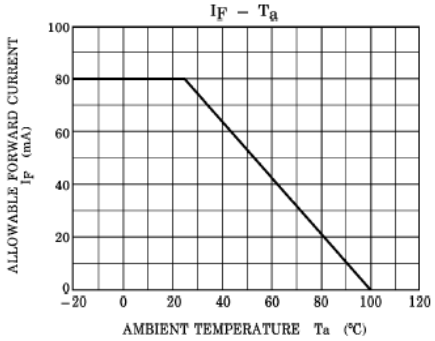
(Note 1) Pulse width 300μs, 2% duty cycle.
(*) Above 25°C ambient.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta = 25°C)

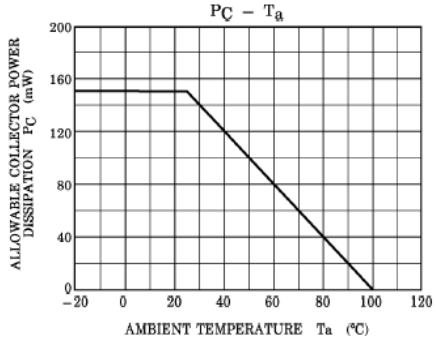
	CHARACTERISTIC		SYMBOL	TEST CONDITION	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
LED	Forward Voltage		V_F	I_F = 10mA	—	1.15	1.5	V
	Reverse Current		I_R	V_R = 3V	—	—	100	μA
	Capacitance		C_D	V = 0, f = 1MHz	—	30	—	pF
DETECTOR	DC Forward Current Gain		h_{FE}	V_{CE} = 5V, I_C = 500μA	—	200	—	—
	Collector-Emitter Breakdown Voltage		$V_{(BR)CEO}$	I_C = 1mA, I_F = 0	30	—	—	V
	Collector-Base Breakdown Voltage		$V_{(BR)CBO}$	I_C = 100μA	70	—	—	V
	Emitter-Collector Breakdown Voltage		$V_{(BR)ECO}$	I_E = 100μA	7	—	—	V
	Collector Dark Current		I_{CEO}	V_{CE} = 10V	—	1	50	nA
	Collector Dark Current		I_{CBO}	V_{CB} = 10V	—	0.1	20	nA
	Collector-Emitter Capacitance		C_{CE}	V = 0, f = 1MHz	—	10	—	pF
COUPLED	Current Transfer Ratio		I_C / I_F	I_F = 10mA, V_{CE} = 10V	20	100	—	%
	Collector-Emitter Saturation Voltage		$V_{CE(sat)}$	I_F = 50mA, I_C = 2mA	—	0.1	0.5	V
	Capacitance Input to Output		C_S	V_S = 0, f = 1MHz	—	0.8	—	pF
	Isolation Resistance		R_S	V_S = 500V, R. H. ≦ 60%	10^{11}	—	—	Ω
	Isolation Voltage		BV_S	AC, 1 minute	2500	—	—	Vrms
		4N25, 4N25A	BV_S (*)	AC, Peak	2500	—	—	Vpk
		4N26, 4N27			1500	—	—	
		4N28			500	—	—	
		4N25A		AC, 1 second	1775	—	—	Vrms
	Rise / Fall Time		t_r / t_f	V_{CE} = 10V, I_C = 2mA R_L = 100Ω	—	2	—	μs
	Rise / Fall Time		t_r / t_f	V_{CB} = 10V, I_{CB} = 50μA R_L = 100Ω	—	200	—	ns

(*) JEDEC registered minimum BV_S, however, TOSHIBA specifies a minimum BV_S of 2500Vrms, 1 minute.

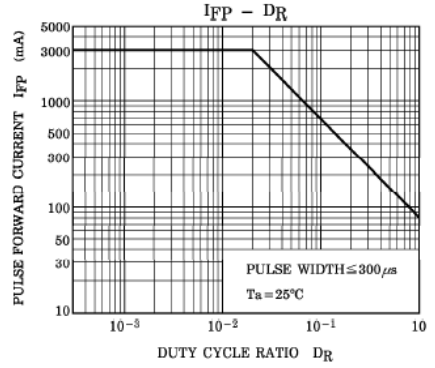
$I_F - T_a$



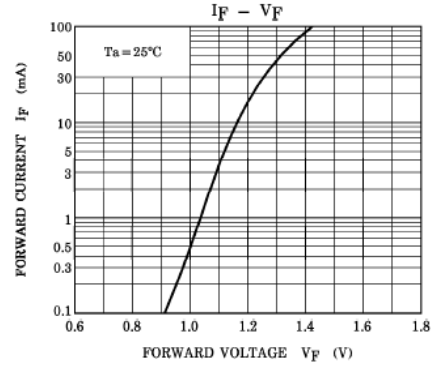
$P_C - T_a$



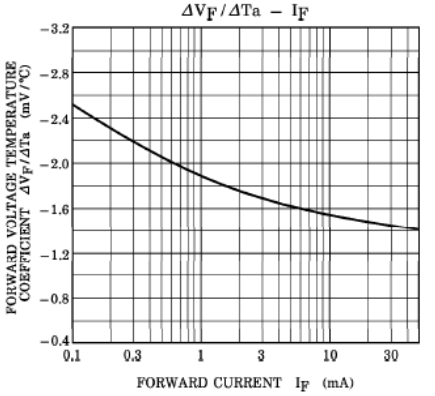
$I_{FP} - D_R$



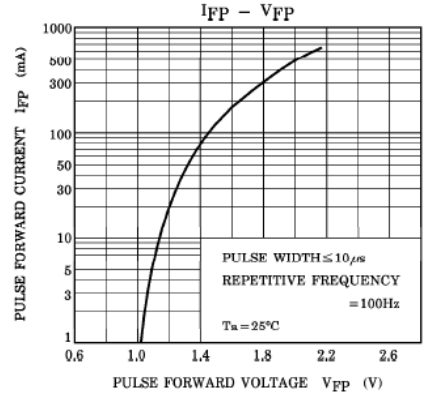
$I_F - V_F$



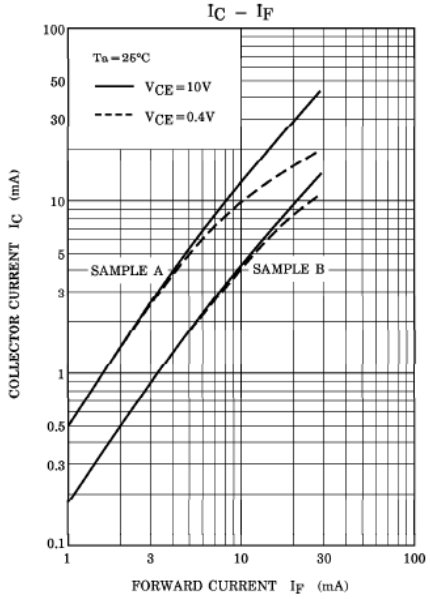
$\Delta V_F / \Delta Ta - I_F$



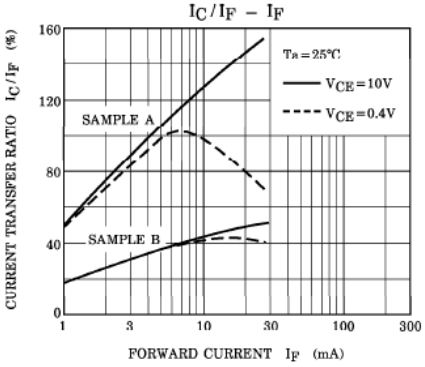
$I_{FP} - V_{FP}$



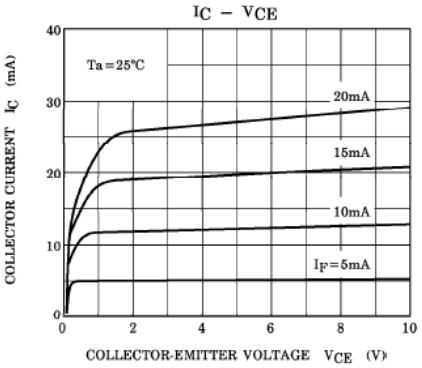
$I_C - I_F$



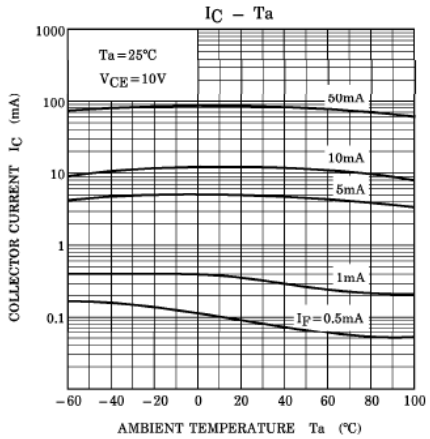
$I_C / I_F - I_F$



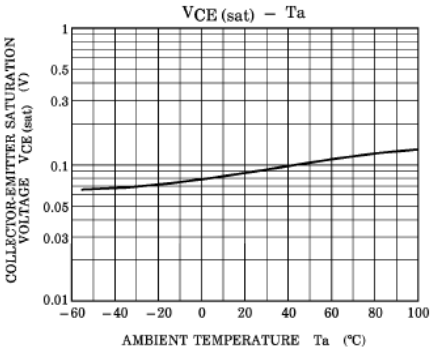
$I_C - V_{CE}$



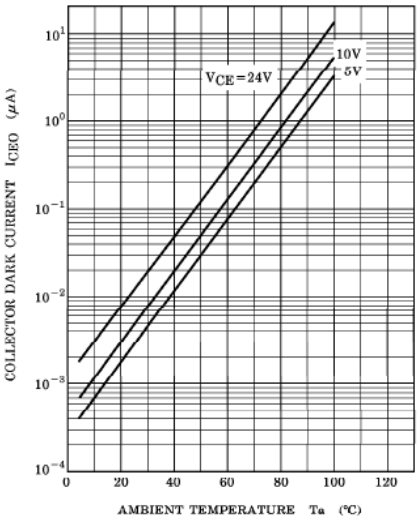
$I_C - Ta$



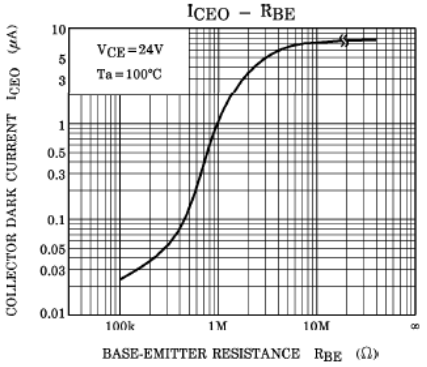
$V_{CE\,(sat)} - Ta$



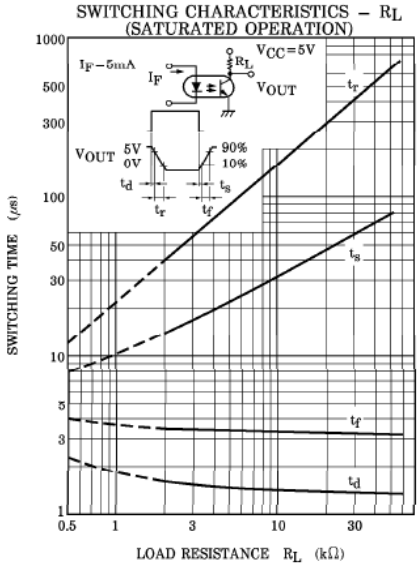
I_{CEO} – Ta



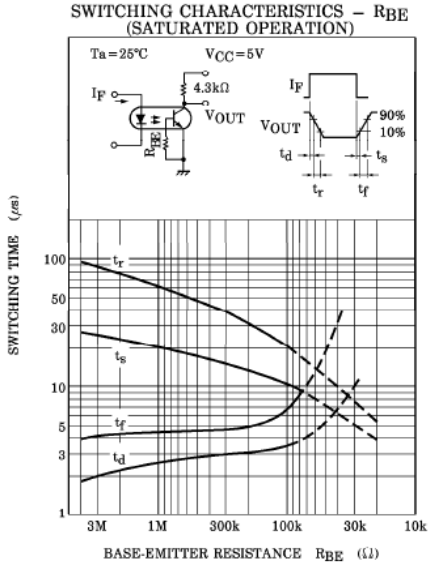
I_{CEO} – R_{BE}



SWITCHING CHARACTERISTICS – R_L
(SATURATED OPERATION)



SWITCHING CHARACTERISTICS – R_{BE}
(SATURATED OPERATION)



ELECTRONICS, INC.
44 FARRAND STREET
BLOOMFIELD, NJ 07003
(973) 748–5089

NTE3087
Optoisolator
High Speed, Open Collector, NAND Gate Output

Description:

The NTE3087 is an optoisolator which combines a GaAsP LED as the emitter and an integrated high gain multi–stage high speed photodetector. The output of the detector circuit is an open collector, Schottky clamped transistor capable of sinking 50mA. The open collector output provides capability for bussing, ORing and strobing. The NTE3087 is packaged in a plastic 8–pin mini–DIP.

Features:

- LSTTL/TTL Compatible: 5V Supply
- Ultra High Speed
- Guaranteed Performance Over Temperature
- High Isolation Voltage: 2500V_{rms}

Absolute Maximum Ratings: (T_A = 0°C to +70°C unless otherwise specified)

Input Forward Current (Note 2), I_F 20mA
Pulse Forward Current (Note 3), I_{FP} 40mA
Reverse Voltage, V_R 5V
Output Current, I_O 50mA
Output Voltage, V_O 7V
Supply Voltage (1 minute max), V_{CC} 7V
Enable Input Voltage (Not to Exceed V_{CC} by More than 500mV), V_{EH} 5.5V
Output Collector Power Dissipation, P_O 85mW
Operating Temperature Range, T_{opr} . . . . . 0° to +70°C
Storage Temperature Range, T_{stg} . . . . . –55° to +125°C
Isolation Voltage (Note 3), BV_S . . . . . 2500V_{rms}

Note 1. Device considered a two–terminal device: Pin1, 2, 3, and 4 are shorted together, and Pin5, 6, 7, and 8 are shorted together.
Note 2. 50% Duty Cycle, 1ms Pulse Width.
Note 3. R.H. = 40 to 60%, AC/1min.

Recommended Operating Conditions:

Parameter	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Input Current, Low Level (Each Channel)	I_{FL}		0	–	250	µA
Input Current, High Level (Each Channel)	I_{FH}		6.3	–	15.0	mA
Enable Voltage, Low Level (Output High)	V_{EL}		0	–	0.8	V
Enable Voltage, High Level	V_{EH}		2.0	–	V_{CC}	V
Operating Temperature	T_A		0	–	70	°C
Fan Out (TTL Load)	N		–	–	8	

Electrical Characteristics: (T_A = 0°C to +70°C, Note 4 unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
High Level Output Current	I_{OH}	V_{CC} = 5.5V, V_O = 5.5V, I_F = 250μA, V_E = 2V	–	1	250	μA
Low Level Output Voltage	V_{OL}	V_{CC} = 5.5V, I_F = 5mA, V_{EH} = 2V, I_{OL} = 13mA	–	0.4	0.6	V
High Level Enable Current	I_{EH}	V_{CC} = 5.5V, V_E = 2.0V	–	–1.0	–	mA
Low Level Enable Current	I_{EL}	V_{CC} = 5.5V, V_E = 0.5V	–	–1.6	–2.0	mA
High Level Supply Current	I_{CCH}	V_{CC} = 5.5V, I_F = 0, V_E = 0.5V	–	7	14	mA
Low Level Supply Current	I_{CCL}	V_{CC} = 5.5V, I_F = 10mA, V_E = 0.5V	–	12	18	mA
Resistance (Input–to–Output)	R_{I-O}	V_{I-O} = 500V, T_A = +25°C	–	10^{12}	–	Ω
Capacitance (Input–to–Output)	C_{I-O}	f = 1MHz, T_A = +25°C	–	0.6	–	pF
Input Forward Voltage	V_F	I_F = 10mA, T_A = +25°C	–	1.65	1.9	V
Input Reverse Breakdown Voltage	$V_{(BR)R}$	I_R = 10μA, T_A = +25°C	5.0	–	–	V
Input Capacitance	C_{IN}	V_F = 0, f = 1MHz	–	30	–	pF
Current Transfer Ratio	CTR	I_F = 5mA, R_L = 10Ω	–	1000	–	%

Note 4. All typical values at V_{CC} = 5V, T_A = +25°C.

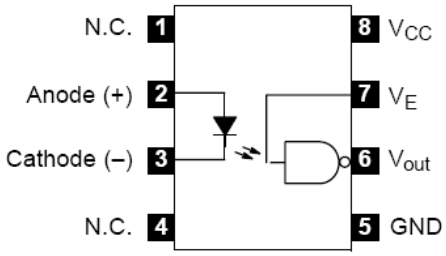
Switching Characteristics: (T_A = +25°C, V_{CC} = 5V unless otherwise specified)

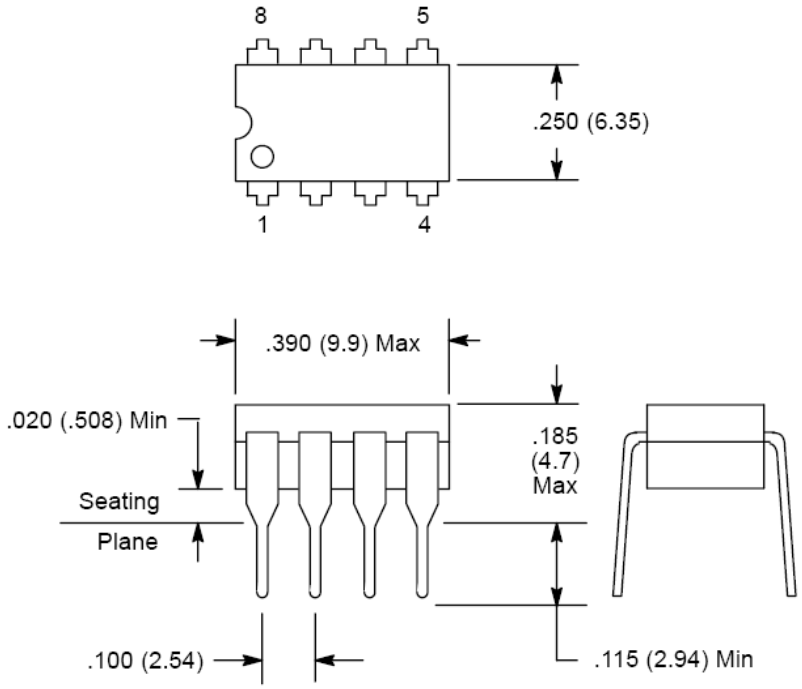
Parameter	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Propagation Delay Time to High level Output	t_{PLH}	R_L = 350Ω, C_L = 15pF, I_F = 7.5mA	–	60	120	ns
Propagation Delay Time to Low level Output	t_{PLH}		–	60	120	ns
Output Rise–Fall Time (10% to 90%)	t_r, t_f	R_L = 350Ω, C_L = 15pF, I_F = 7.5mA	–	30	–	ns
Propagation Delay Time of Enable from V_{EH} to V_{EL}	t_{ELH}	R_L = 350Ω, C_L = 15pF, I_F = 7.5mA, V_{EH} = 3V, V_{EL} = 0.5V	–	25	–	ns
Propagation Delay Time of Enable from V_{EL} to V_{EH}	t_{EHL}		–	25	–	ns
Common Mode Transient Immunity at Logic High Outut Level	CM_H	V_{CM} = 10V, R_L = 350Ω, $V_{O(min)}$ = 2V, I_F = 0mA	–	150	–	V/μs
Common Mode Transient Immunity at Logic Low Outut Level	CM_L	V_{CM} = 10V, R_L = 350Ω, $V_{O(max)}$ = 0.8V, I_F = 5mA	–	–150	–	V/μs

Truth Table: (0.1μF bypass capacitor must be connected between Pin8 and Pin5)

Input	Enable	Output
H	H	L
L	H	H
H	L	H
L	L	H

Pin Connection Diagram





ELECTRONICS, INC.
44 FARRAND STREET
BLOOMFIELD, NJ 07003
(973) 748–5089

NTE66
MOSFET
N–Ch, Enhancement Mode
High Speed Switch

Description:

The NTE66 is a TMOS Power FET in a TO220 type package designed for high voltage, high speed power switching applications such as switching regulators, converters, solenoid and relay drivers.

Features:

- Lower $R_{DS(ON)}$
- Improved Inductive Ruggedness
- Fast Switching Times
- Lower Input Capacitance
- Extended Safe Operating Area
- Improved High Temperature Reliability

Absolute Maximum Ratings:

Drain–Source Voltage (T_J = +25°C to +150°C), V_{DSS} 100V
Drain–Gate Voltage (R_{GS} = 1MΩ, T_J = +25°C to +125°C), V_{DGR} 100V
Gate–Source Voltage, V_{GS} . . . . . ±20V
Continuous Drain Current, I_D
T_C = +25°C 14A
T_C = +100°C 10A
Pulsed Drain Current (Note 2), I_{DM} 56A
Pulsed Gate Current, I_{GM} . . . . . ±1.5A
Single Pulsed Avalanche Energy (Note 3), E_{AS} 69mJ
Avalanche Current, I_{AS} 14A
Total Power Dissipation (T_C = +25°C), P_D 77W
Derate Above 25°C . . . . . 0.62W/°C
Operating Junction Temperature Range, T_J . . . . . –55° to +150°C
Storage Temperature Range, T_{stg} . . . . . –55° to +150°C
Lead Temperature (During Soldering, 1/8" from case, 5sec max.), T_L . . . . . +300°C
Thermal Resistance, Junction–to–Case, $R_{\Theta JC}$ 1.62K/W
Thermal Resistance, Junction–to–Ambient, $R_{\Theta JA}$ 80K/W
Thermal Resistance, Case–to–Sink (Mounting surface flat, smooth, and greased), $R_{\Theta CS}$. 0.5K/W

Note 1. Pulse Test: Pulse Width ≤ 300μs, Duty Cycle ≤ 2%.
Note 2. Repetitive rating: Pulse width limited by max, junction temperature.
Note 3. L = 0.53mH, V_{dd} = 25V, R_G = 25Ω, Starting T_J = +25°C.

Electrical Characteristics: (T_C = +25°C unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Drain–Source Breakdown Voltage	BV_{DSS}	V_{GS} = 0V, I_D = 250µA	100	–	–	V
Gate Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250µA	2.0	–	4.0	V
Gate–Source Leakage, Forward	I_{GSS}	V_{GS} = 20V	–	–	100	nA
Gate–Source Leakage, Reverse	I_{GSS}	V_{GS} = –20V	–	–	–100	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	V_{DS} = Max. Rating, V_{GS} = 0V	–	–	250	µA
		V_{DS} = Max. Rating x 0.8, V_{GS} = 0V, T_C = +125°C	–	–	1000	µA
On–State Drain–Source Current	$I_{D(on)}$	V_{DS} > $I_{D(on)}$ x $R_{DS(on)}$max, V_{GS} = 10V, Note 1	14	–	–	A
Static Drain–Source On–State Resistance	$R_{DS(on)}$	V_{GS} = 10V, I_D = 8.3A, Note 1	–	0.10	0.16	Ω
Forward Transconductance	g_{fs}	V_{DS} ≥ 50V, I_D = 8.3A, Note 1	5.1	7.6	–	mhos
Input Capacitance	C_{iss}	V_{GS} = 0V, V_{DS} = 25V, f = 1MHz	–	640	–	pF
Output Capacitance	C_{oss}		–	240	–	pF
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}		–	72	–	pF
Turn–On Delay Time	$t_{d(on)}$	V_{DD} = 0.5BV_{DSS}, I_D = 8.3A, Z_O = 12Ω (MOSFET switching times are essentially independent of operating temperature)	–	10	15	ns
Rise Time	t_r		–	34	51	ns
Turn–Off Delay Time	$t_{d(off)}$		–	23	35	ns
Fall Time	t_f		–	24	36	ns
Total Gate Charge (Gate–Source Plus Gate–Drain)	Q_g	V_{GS} = 10V, I_D = 14A, V_{DS} = 0.8 Max. Rating (Gate charge is essentially independent of operating temperature)	–	17	26	nC
Gate–Source Charge	Q_{gs}		–	3.7	5.5	nC
Gate–Drain ("Miller") Charge	Q_{gd}		–	7	11	nC

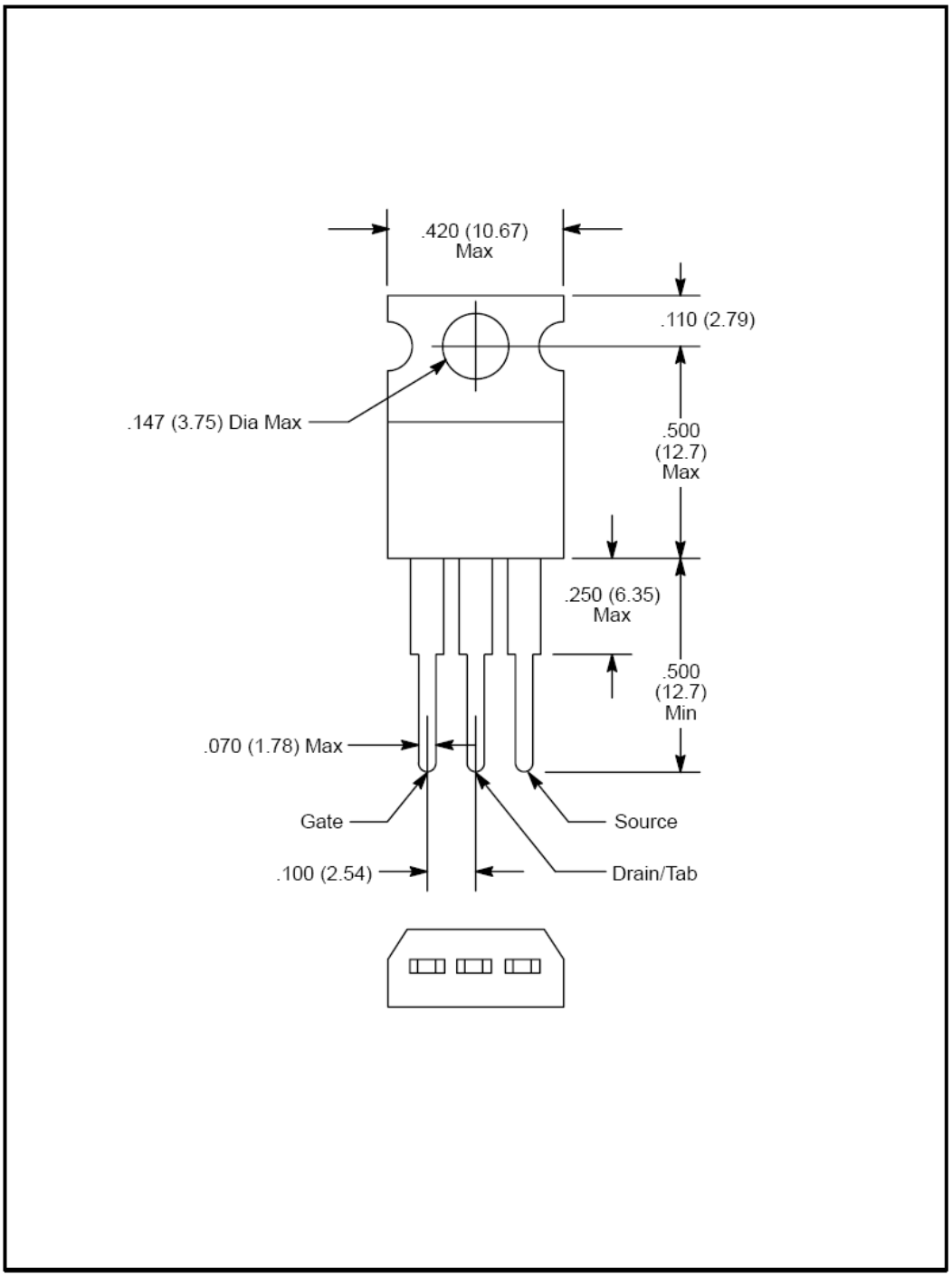
Note 1. Pulse Test: Pulse Width ≤ 300µs, Duty Cycle ≤ 2%.

Source–Drain Diode Ratings and Characteristics:

Parameter	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Continuous Source Current (Body Diode)	I_S		–	–	14	A
Pulse Source Current (Body Diode)	I_{SM}	Note 2	–	–	56	A
Diode Forward Voltage	V_{SD}	T_C = +25°C, I_S = 14A, V_{GS} = 0V	–	–	2.5	V
Reverse Recovery Time	t_{rr}	T_J = +25°C, I_F = 14A, dI_F/dt = 100A/µs	–	120	250	ns

Note 1. Pulse Test: Pulse Width ≤ 300µs, Duty Cycle ≤ 2%.

Note 2. Repetitive rating: Pulse width limited by max, junction temperature.


.420 (10.67)
Max
.110 (2.79)
.147 (3.75) Dia Max
.500
(12.7)
Max
.250 (6.35)
Max
.500
(12.7)
Min
.070 (1.78) Max
Gate
Source
.100 (2.54)
Drain/Tab

MICROCHIP

PIC16F87XA

28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers

Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873A
- PIC16F874A
- PIC16F876A
- PIC16F877A

High-Performance RISC CPU:

- Only 35 single-word instructions to learn
- All single-cycle instructions except for program branches, which are two-cycle
- Operating speed: DC – 20 MHz clock input
  DC – 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of Flash Program Memory, Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM), Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to other 28-pin or 40/44-pin PIC16CXXX and PIC16FXXX microcontrollers

Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler, can be incremented during Sleep via external crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
  - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
  - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
  - PWM max. resolution is 10-bit
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master mode) and I^2C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address detection
- Parallel Slave Port (PSP) – 8 bits wide with external $\overline{RD}$, $\overline{WR}$ and $\overline{CS}$ controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for Brown-out Reset (BOR)

Analog Features:

- 10-bit, up to 8-channel Analog-to-Digital Converter (A/D)
- Brown-out Reset (BOR)
- Analog Comparator module with:
  - Two analog comparators
  - Programmable on-chip voltage reference (V_{REF}) module
  - Programmable input multiplexing from device inputs and internal voltage reference
  - Comparator outputs are externally accessible

Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM memory typical
- Data EEPROM Retention > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- Single-supply 5V In-Circuit Serial Programming
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving Sleep mode
- Selectable oscillator options
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

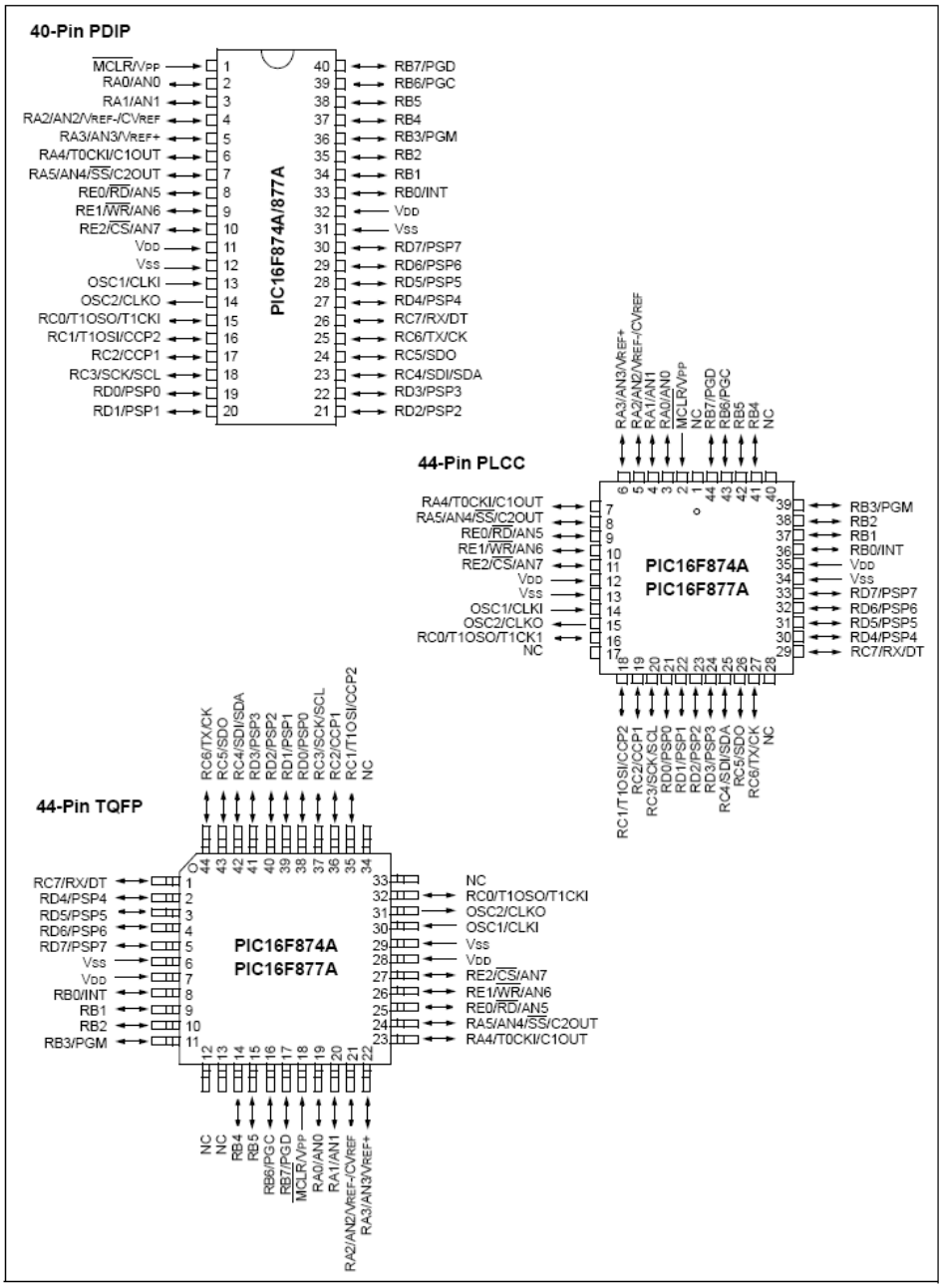
CMOS Technology:

- Low-power, high-speed Flash/EEPROM technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low-power consumption

Device	Program Memory		Data SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	I/O	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit	Comparators
	Bytes	# Single Word Instructions						SPI	Master I^2C			
PIC16F873A	7.2K	4096	192	128	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F874A	7.2K	4096	192	128	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F876A	14.3K	8192	368	256	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F877A	14.3K	8192	368	256	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2

© 2003 Microchip Technology Inc.

Pin Diagrams (Continued)



National Semiconductor

July 2006

LM555
Timer

General Description

The LM555 is a highly stable device for generating accurate time delays or oscillation. Additional terminals are provided for triggering or resetting if desired. In the time delay mode of operation, the time is precisely controlled by one external resistor and capacitor. For astable operation as an oscillator, the free running frequency and duty cycle are accurately controlled with two external resistors and one capacitor. The circuit may be triggered and reset on falling waveforms, and the output circuit can source or sink up to 200mA or drive TTL circuits.

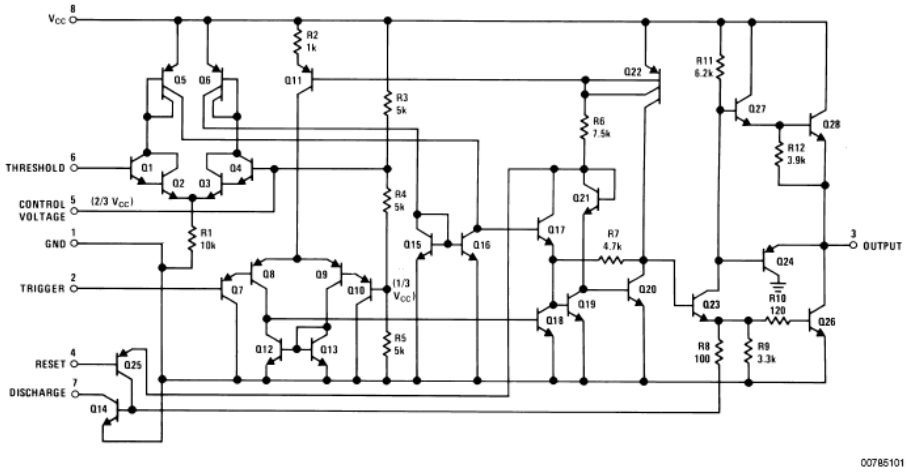
Features

- Direct replacement for SE555/NE555
- Timing from microseconds through hours
- Operates in both astable and monostable modes
- Adjustable duty cycle
- Output can source or sink 200 mA
- Output and supply TTL compatible
- Temperature stability better than 0.005% per °C
- Normally on and normally off output
- Available in 8-pin MSOP package

Applications

- Precision timing
- Pulse generation
- Sequential timing
- Time delay generation
- Pulse width modulation
- Pulse position modulation
- Linear ramp generator

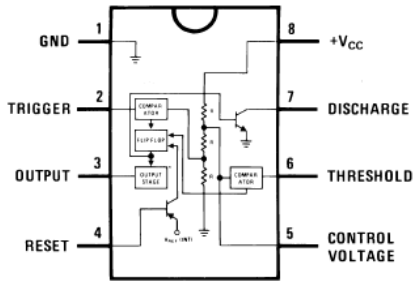
Schematic Diagram



© 2006 National Semiconductor Corporation

Connection Diagram

Dual-In-Line, Small Outline
and Molded Mini Small Outline Packages



Top View

Ordering Information

Package	Part Number	Package Marking	Media Transport	NSC Drawing
8-Pin SOIC	LM555CM	LM555CM	Rails	M08A
	LM555CMX	LM555CM	2.5k Units Tape and Reel	
8-Pin MSOP	LM555CMM	Z55	1k Units Tape and Reel	MUA08A
	LM555CMMX	Z55	3.5k Units Tape and Reel	
8-Pin MDIP	LM555CN	LM555CN	Rails	N08E

Absolute Maximum Ratings (Note 2)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/ Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	+18V
Power Dissipation (Note 3)	
LM555CM, LM555CN	1180 mW
LM555CMM	613 mW
Operating Temperature Ranges	
LM555C	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	−65°C to +150°C

Soldering Information

Dual-In-Line Package	
Soldering (10 Seconds)	260°C
Small Outline Packages	
(SOIC and MSOP)	
Vapor Phase (60 Seconds)	215°C
Infrared (15 Seconds)	220°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

Electrical Characteristics (Notes 1, 2)

(T_A = 25°C, V_{CC} = +5V to +15V, unless othewise specified)

Parameter	Conditions	Limits			Units
		LM555C			
		Min	Typ	Max	
Supply Voltage		4.5		16	V
Supply Current	V_{CC} = 5V, R_L = ∞		3	6	
	V_{CC} = 15V, R_L = ∞ (Low State) (Note 4)		10	15	mA
Timing Error, Monostable					
Initial Accuracy			1		%
Drift with Temperature	R_A = 1k to 100kΩ, C = 0.1µF, (Note 5)		50		ppm/°C
Accuracy over Temperature			1.5		%
Drift with Supply			0.1		%/V
Timing Error, Astable					
Initial Accuracy			2.25		%
Drift with Temperature	R_A, R_B = 1k to 100kΩ, C = 0.1µF, (Note 5)		150		ppm/°C
Accuracy over Temperature			3.0		%
Drift with Supply			0.30		%/V
Threshold Voltage			0.667		x V_{CC}
Trigger Voltage	V_{CC} = 15V		5		V
	V_{CC} = 5V		1.67		V
Trigger Current			0.5	0.9	µA
Reset Voltage		0.4	0.5	1	V
Reset Current			0.1	0.4	mA
Threshold Current	(Note 6)		0.1	0.25	µA
Control Voltage Level	V_{CC} = 15V	9	10	11	V
	V_{CC} = 5V	2.6	3.33	4	
Pin 7 Leakage Output High			1	100	nA
Pin 7 Sat (Note 7)					
Output Low	V_{CC} = 15V, I_7 = 15mA		180		mV
Output Low	V_{CC} = 4.5V, I_7 = 4.5mA		80	200	mV

Electrical Characteristics (Notes 1, 2) (Continued)

(T_A = 25˚C, V_{CC} = +5V to +15V, unless othewise specified)

Parameter	Conditions	Limits			Units
		LM555C			
		Min	Typ	Max	
Output Voltage Drop (Low)	V_{CC} = 15V				
	I_{SINK} = 10mA		0.1	0.25	V
	I_{SINK} = 50mA		0.4	0.75	V
	I_{SINK} = 100mA		2	2.5	V
	I_{SINK} = 200mA		2.5		V
	V_{CC} = 5V				
	I_{SINK} = 8mA				V
	I_{SINK} = 5mA		0.25	0.35	V
Output Voltage Drop (High)	I_{SOURCE} = 200mA, V_{CC} = 15V		12.5		V
	I_{SOURCE} = 100mA, V_{CC} = 15V	12.75	13.3		V
	V_{CC} = 5V	2.75	3.3		V
Rise Time of Output			100		ns
Fall Time of Output			100		ns

Note 1: All voltages are measured with respect to the ground pin, unless otherwise specified.

Note 2: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance limits. Electrical Characteristics state DC and AC electrical specifications under particular test conditions which guarantee specific performance limits. This assumes that the device is within the Operating Ratings. Specifications are not guaranteed for parameters where no limit is given, however, the typical value is a good indication of device performance.

Note 3: For operating at elevated temperatures the device must be derated above 25˚C based on a +150˚C maximum junction temperature and a thermal resistance of 106˚C/W (DIP), 170˚C/W (S0-8), and 204˚C/W (MSOP) junction to ambient.

Note 4: Supply current when output high typically 1 mA less at V_{CC} = 5V.

Note 5: Tested at V_{CC} = 5V and V_{CC} = 15V.

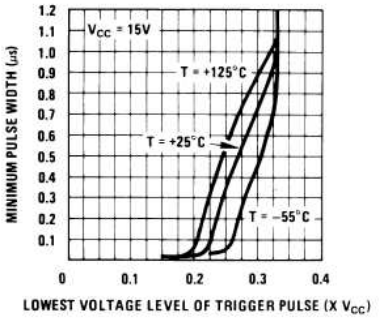
Note 6: This will determine the maximum value of $R_A + R_B$ for 15V operation. The maximum total ($R_A + R_B$) is 20MΩ.

Note 7: No protection against excessive pin 7 current is necessary providing the package dissipation rating will not be exceeded.

Note 8: Refer to RETS555X drawing of military LM555H and LM555J versions for specifications.

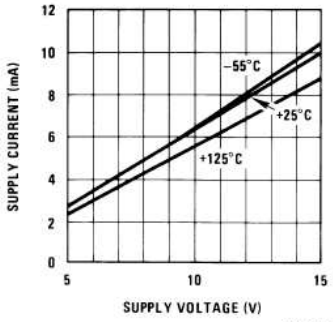
Typical Performance Characteristics

Minimum Pulse Width Required for Triggering



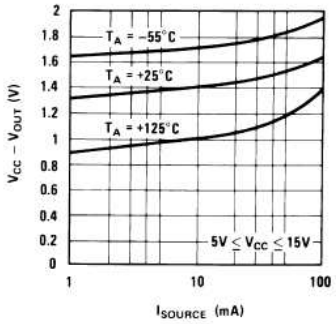
00785104

Supply Current vs. Supply Voltage



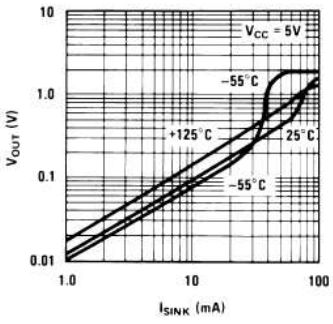
00785119

High Output Voltage vs. Output Source Current



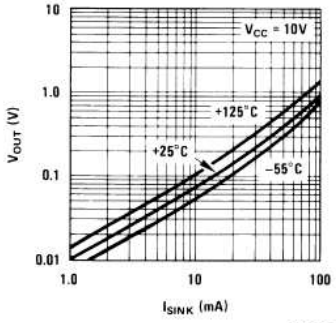
00785120

Low Output Voltage vs. Output Sink Current



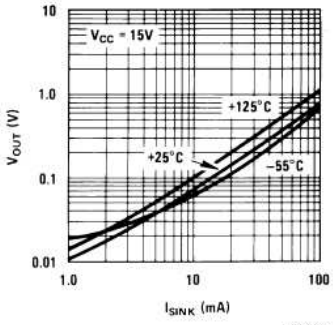
00785121

Low Output Voltage vs. Output Sink Current



00785122

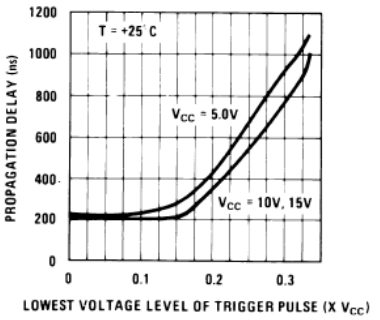
Low Output Voltage vs. Output Sink Current



00785123

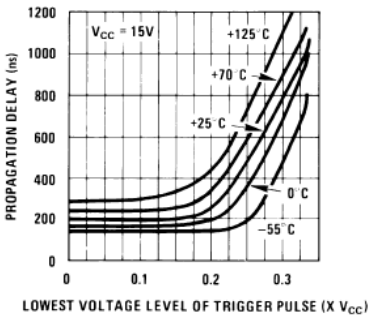
Typical Performance Characteristics (Continued)

Output Propagation Delay vs.
Voltage Level of Trigger Pulse



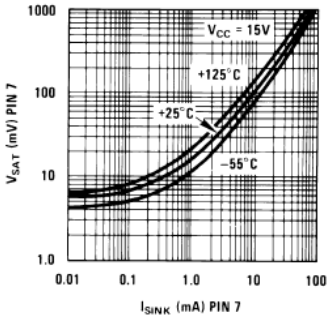
00785124

Output Propagation Delay vs.
Voltage Level of Trigger Pulse



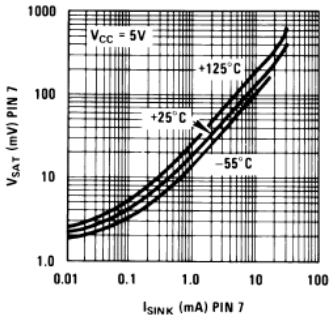
00785125

Discharge Transistor (Pin 7)
Voltage vs. Sink Current



00785126

Discharge Transistor (Pin 7)
Voltage vs. Sink Current



00785127

Applications Information

MONOSTABLE OPERATION

In this mode of operation, the timer functions as a one-shot (*Figure 1*). The external capacitor is initially held discharged by a transistor inside the timer. Upon application of a negative trigger pulse of less than 1/3 V_{CC} to pin 2, the flip-flop is set which both releases the short circuit across the capacitor and drives the output high.

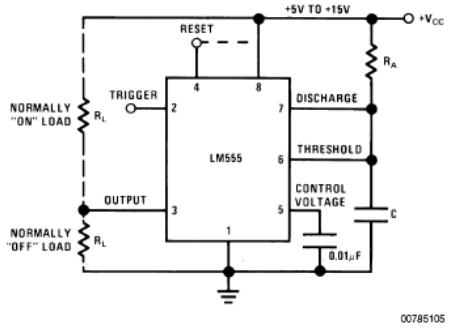
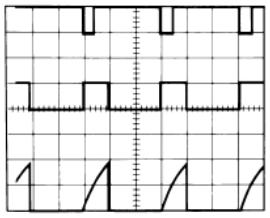


FIGURE 1. Monostable

The voltage across the capacitor then increases exponentially for a period of t = 1.1 R_A C, at the end of which time the voltage equals 2/3 V_{CC}. The comparator then resets the flip-flop which in turn discharges the capacitor and drives the output to its low state. *Figure 2* shows the waveforms generated in this mode of operation. Since the charge and the threshold level of the comparator are both directly proportional to supply voltage, the timing interval is independent of supply.



V_{CC} = 5V
TIME = 0.1 ms/DIV.
R_A = 9.1kΩ
C = 0.01μF

Top Trace: Input 5V/Div.
Middle Trace: Output 5V/Div.
Bottom Trace: Capacitor Voltage 2V/Div.

FIGURE 2. Monostable Waveforms

During the timing cycle when the output is high, the further application of a trigger pulse will not effect the circuit so long as the trigger input is returned high at least 10μs before the end of the timing interval. However the circuit can be reset during this time by the application of a negative pulse to the reset terminal (pin 4). The output will then remain in the low state until a trigger pulse is again applied.

When the reset function is not in use, it is recommended that it be connected to V_{CC} to avoid any possibility of false triggering.

Figure 3 is a nomograph for easy determination of R, C values for various time delays.

NOTE: In monostable operation, the trigger should be driven high before the end of timing cycle.

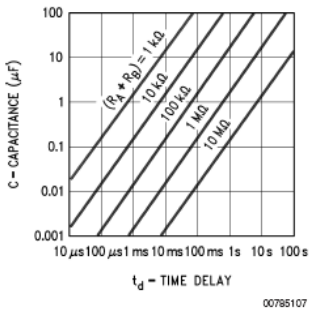


FIGURE 3. Time Delay

ASTABLE OPERATION

If the circuit is connected as shown in *Figure 4* (pins 2 and 6 connected) it will trigger itself and free run as a multivibrator. The external capacitor charges through R_A + R_B and discharges through R_B. Thus the duty cycle may be precisely set by the ratio of these two resistors.

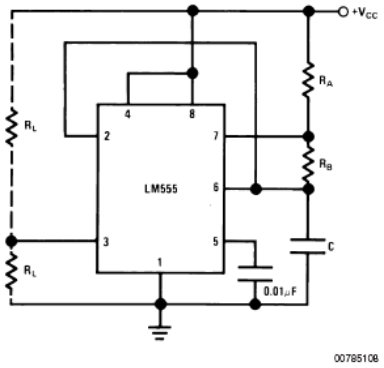
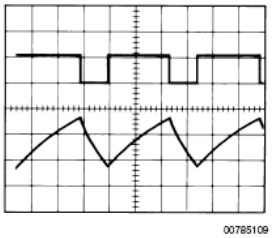


FIGURE 4. Astable

In this mode of operation, the capacitor charges and discharges between 1/3 V_{CC} and 2/3 V_{CC}. As in the triggered mode, the charge and discharge times, and therefore the frequency are independent of the supply voltage.

Applications Information (Continued)

Figure 5 shows the waveforms generated in this mode of operation.



00785109

V_{CC} = 5V
TIME = 20µs/DIV.
R_A = 3.9kΩ
R_B = 3kΩ
C = 0.01µF

Top Trace: Output 5V/Div.
Bottom Trace: Capacitor Voltage 1V/Div.

FIGURE 5. Astable Waveforms

The charge time (output high) is given by:

$$t_1 = 0.693\ (R_A + R_B)\ C$$

And the discharge time (output low) by:

$$t_2 = 0.693\ (R_B)\ C$$

Thus the total period is:

$$T = t_1 + t_2 = 0.693\ (R_A + 2R_B)\ C$$

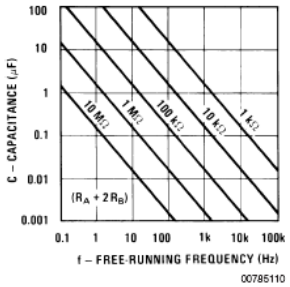
The frequency of oscillation is:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B)\ C}$$

Figure 6 may be used for quick determination of these RC values.

The duty cycle is:

$$D = \frac{R_B}{R_A + 2R_B}$$

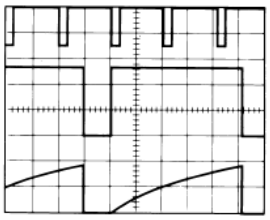


00785110

FIGURE 6. Free Running Frequency

FREQUENCY DIVIDER

The monostable circuit of *Figure 1* can be used as a frequency divider by adjusting the length of the timing cycle. *Figure 7* shows the waveforms generated in a divide by three circuit.



00785111

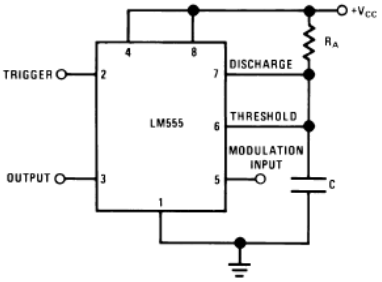
V_{CC} = 5V
TIME = 20µs/DIV.
R_A = 9.1kΩ
C = 0.01µF

Top Trace: Input 4V/Div.
Middle Trace: Output 2V/Div.
Bottom Trace: Capacitor 2V/Div.

FIGURE 7. Frequency Divider

PULSE WIDTH MODULATOR

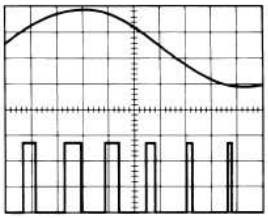
When the timer is connected in the monostable mode and triggered with a continuous pulse train, the output pulse width can be modulated by a signal applied to pin 5. *Figure 8* shows the circuit, and in *Figure 9* are some waveform examples.



00785112

FIGURE 8. Pulse Width Modulator

Applications Information (Continued)



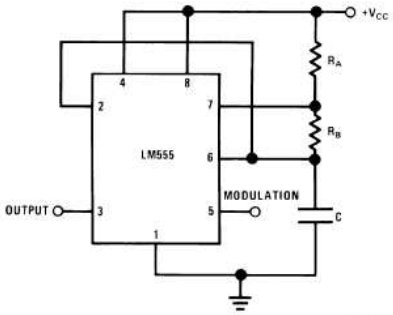
00785113

V_{CC} = 5V Top Trace: Modulation 1V/Div.
TIME = 0.2 ms/DIV. Bottom Trace: Output Voltage 2V/Div.
R_A = 9.1kΩ
C = 0.01µF

FIGURE 9. Pulse Width Modulator

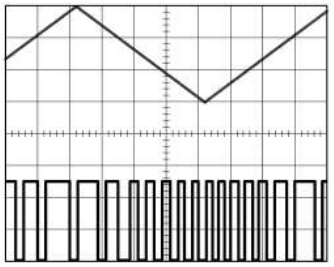
PULSE POSITION MODULATOR

This application uses the timer connected for astable operation, as in *Figure 10*, with a modulating signal again applied to the control voltage terminal. The pulse position varies with the modulating signal, since the threshold voltage and hence the time delay is varied. *Figure 11* shows the waveforms generated for a triangle wave modulation signal.



00785114

FIGURE 10. Pulse Position Modulator



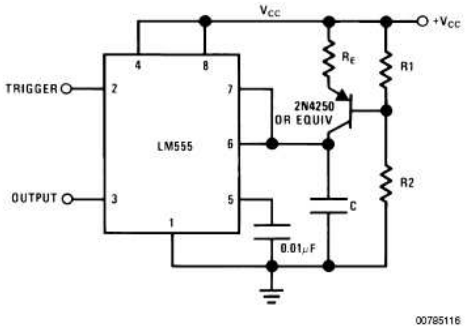
00785115

V_{CC} = 5V Top Trace: Modulation Input 1V/Div.
TIME = 0.1 ms/DIV. Bottom Trace: Output 2V/Div.
R_A = 3.9kΩ
R_B = 3kΩ
C = 0.01µF

FIGURE 11. Pulse Position Modulator

LINEAR RAMP

When the pullup resistor, R_A, in the monostable circuit is replaced by a constant current source, a linear ramp is generated. *Figure 12* shows a circuit configuration that will perform this function.



00785116

FIGURE 12.

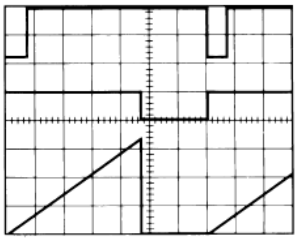
Figure 13 shows waveforms generated by the linear ramp. The time interval is given by:

$$T = \frac{2/3\, V_{CC}\, R_E\, (R_1 + R_2)\, C}{R_1\, V_{CC} - V_{BE}\, (R_1 + R_2)}$$

$$V_{BE} \simeq 0.6V$$

$V_{BE} \simeq 0.6V$

Applications Information (Continued)



00785117

V_{CC} = 5V Top Trace: Input 3V/Div.
TIME = 20µs/DIV. Middle Trace: Output 5V/Div.
R_1 = 47kΩ Bottom Trace: Capacitor Voltage 1V/Div.
R_2 = 100kΩ
R_E = 2.7 kΩ
C = 0.01 µF

FIGURE 13. Linear Ramp

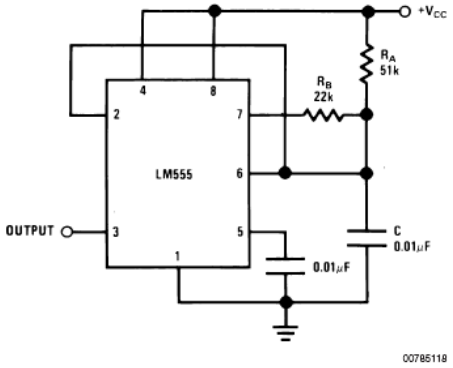
50% DUTY CYCLE OSCILLATOR

For a 50% duty cycle, the resistors R_A and R_B may be connected as in *Figure 14*. The time period for the output high is the same as previous, $t_1 = 0.693\ R_A\ C$. For the output low it is t_2 =

$$\left[(R_A\ R_B)/(R_A + R_B)\right] C\ \ell n \left[\frac{R_B - 2R_A}{2R_B - R_A}\right]$$

Thus the frequency of oscillation is

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2}$$



00785118

FIGURE 14. 50% Duty Cycle Oscillator

Note that this circuit will not oscillate if R_B is greater than 1/2 R_A because the junction of R_A and R_B cannot bring pin 2 down to 1/3 V_{CC} and trigger the lower comparator.

ADDITIONAL INFORMATION

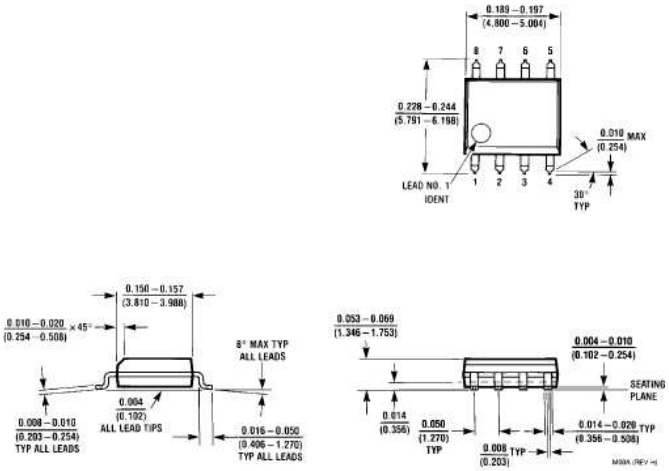
Adequate power supply bypassing is necessary to protect associated circuitry. Minimum recommended is 0.1µF in parallel with 1µF electrolytic.

Lower comparator storage time can be as long as 10µs when pin 2 is driven fully to ground for triggering. This limits the monostable pulse width to 10µs minimum.

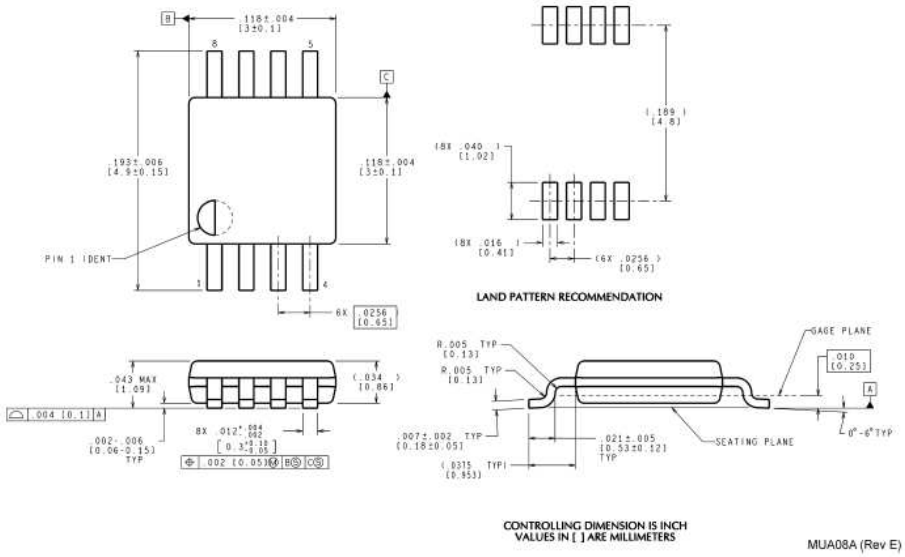
Delay time reset to output is 0.47µs typical. Minimum reset pulse width must be 0.3µs, typical.

Pin 7 current switches within 30ns of the output (pin 3) voltage.

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted



Small Outline Package (M)
NS Package Number M08A

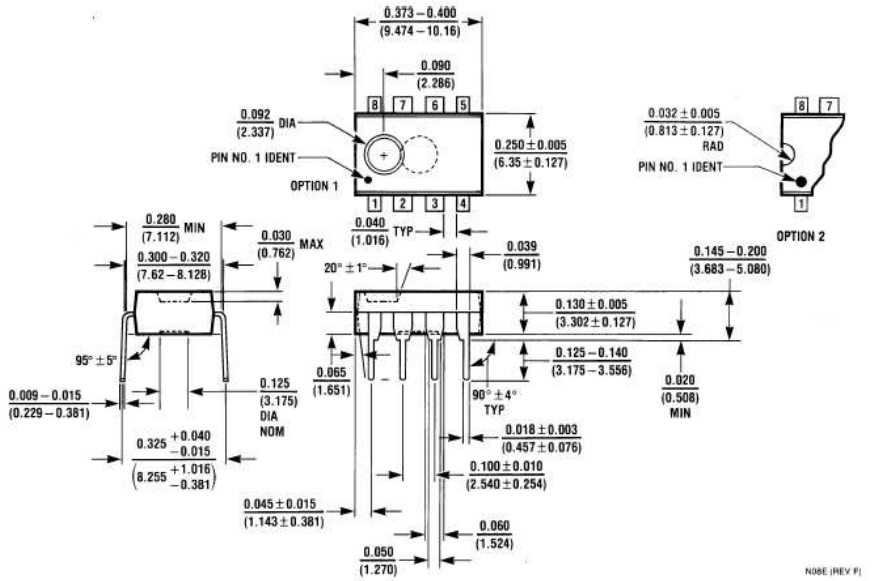


CONTROLLING DIMENSION IS INCH
VALUES IN [ ] ARE MILLIMETERS

MUA08A (Rev E)

8-Lead (0.118" Wide) Molded Mini Small Outline Package
NS Package Number MUA08A

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



Molded Dual-In-Line Package (N)
NS Package Number N08E

National does not assume any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and National reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

For the most current product information visit us at www.national.com.

LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT AND GENERAL COUNSEL OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

BANNED SUBSTANCE COMPLIANCE

National Semiconductor follows the provisions of the Product Stewardship Guide for Customers (CSP-9-111C2) and Banned Substances and Materials of Interest Specification (CSP-9-111S2) for regulatory environmental compliance. Details may be found at: www.national.com/quality/green.

Lead free products are RoHS compliant.

National Semiconductor
Americas Customer
Support Center
Email: new.feedback@nsc.com
Tel: 1-800-272-9959

www.national.com

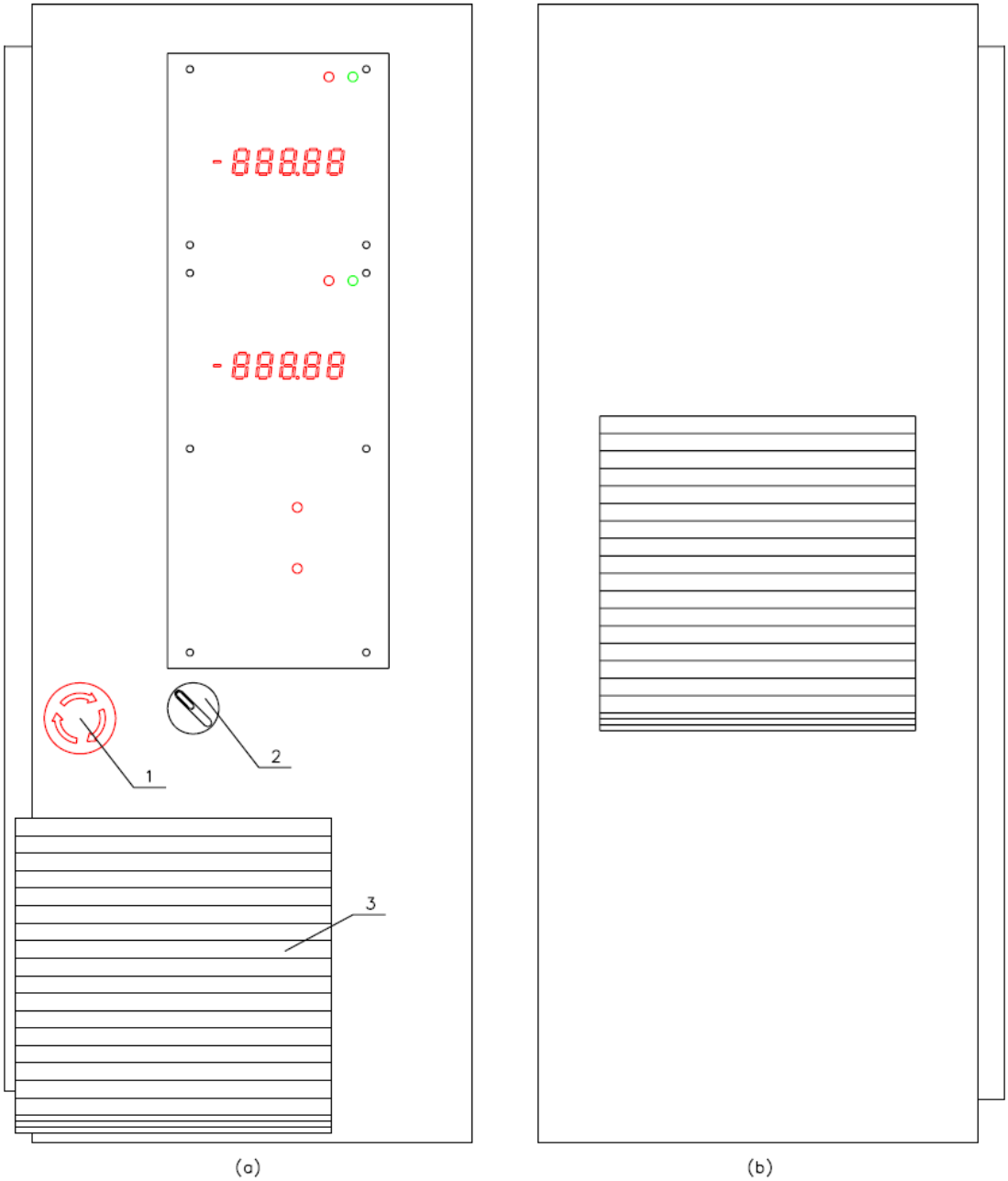
National Semiconductor
Europe Customer Support Center
Fax: +49 (0) 180-530 85 86
Email: europe.support@nsc.com
Deutsch Tel: +49 (0) 69 9508 6208
English Tel: +44 (0) 870 24 0 2171
Français Tel: +33 (0) 1 41 91 8790

National Semiconductor
Asia Pacific Customer
Support Center
Email: ap.support@nsc.com

National Semiconductor
Japan Customer Support Center
Fax: 81-3-5639-7507
Email: jpn.feedback@nsc.com
Tel: 81-3-5639-7560

ANEXO C

DIAGRAMAS DE MONTAJE DEL TABLERO PRINCIPAL



1 – INTERRUPTOR PARO DE EMERGENCIA S2
2 – INTERRUPTOR PRINCIPAL S1
3 – FILTRO

Figura C1.1 (a) Elementos de acceso al operador, visualizadores, (b) Parte posterior del tablero principal

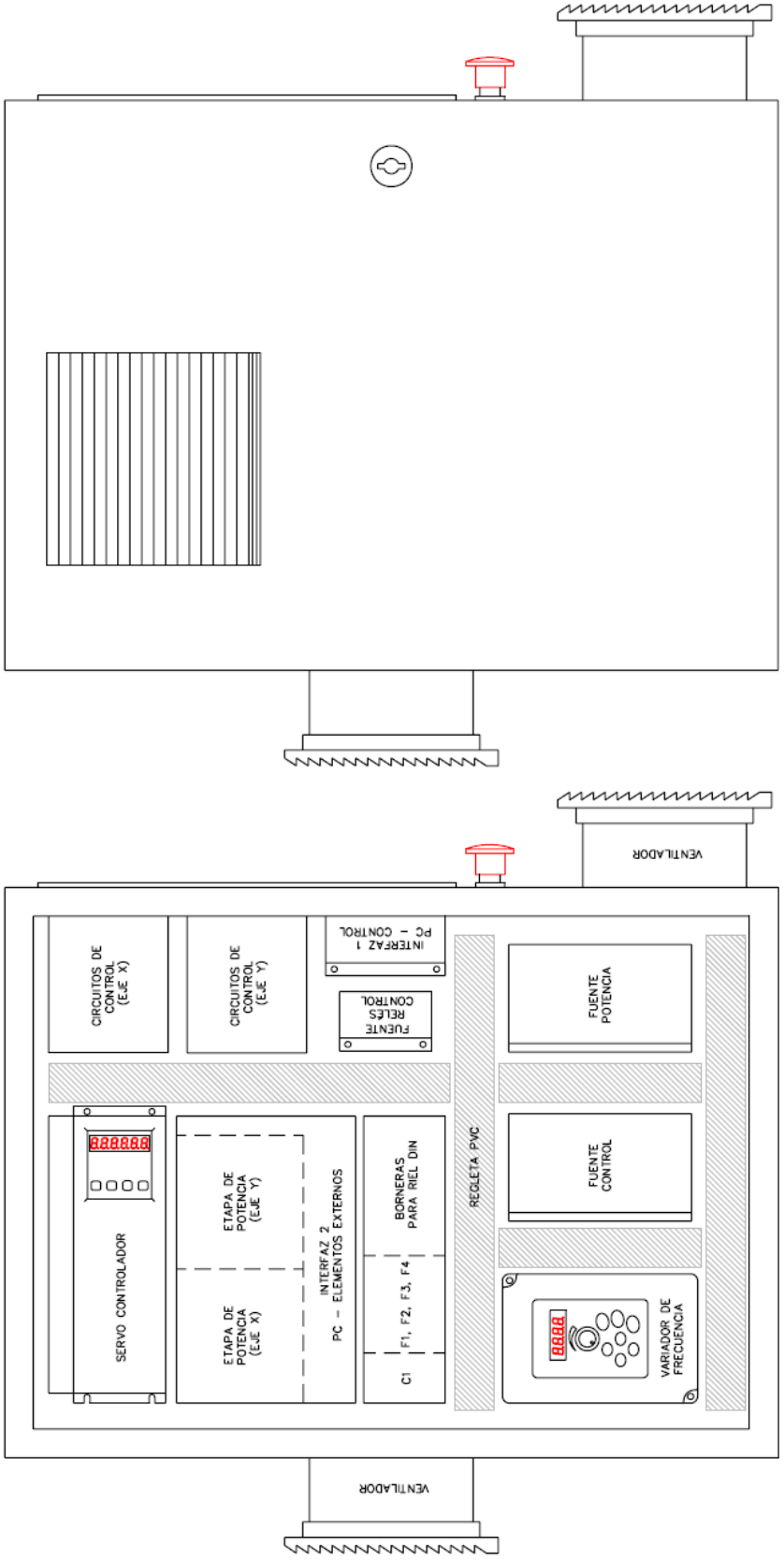


Figura C1.2 (a) Distribución de elementos en tablero principal, (b) Tablero principal puerto cerrado

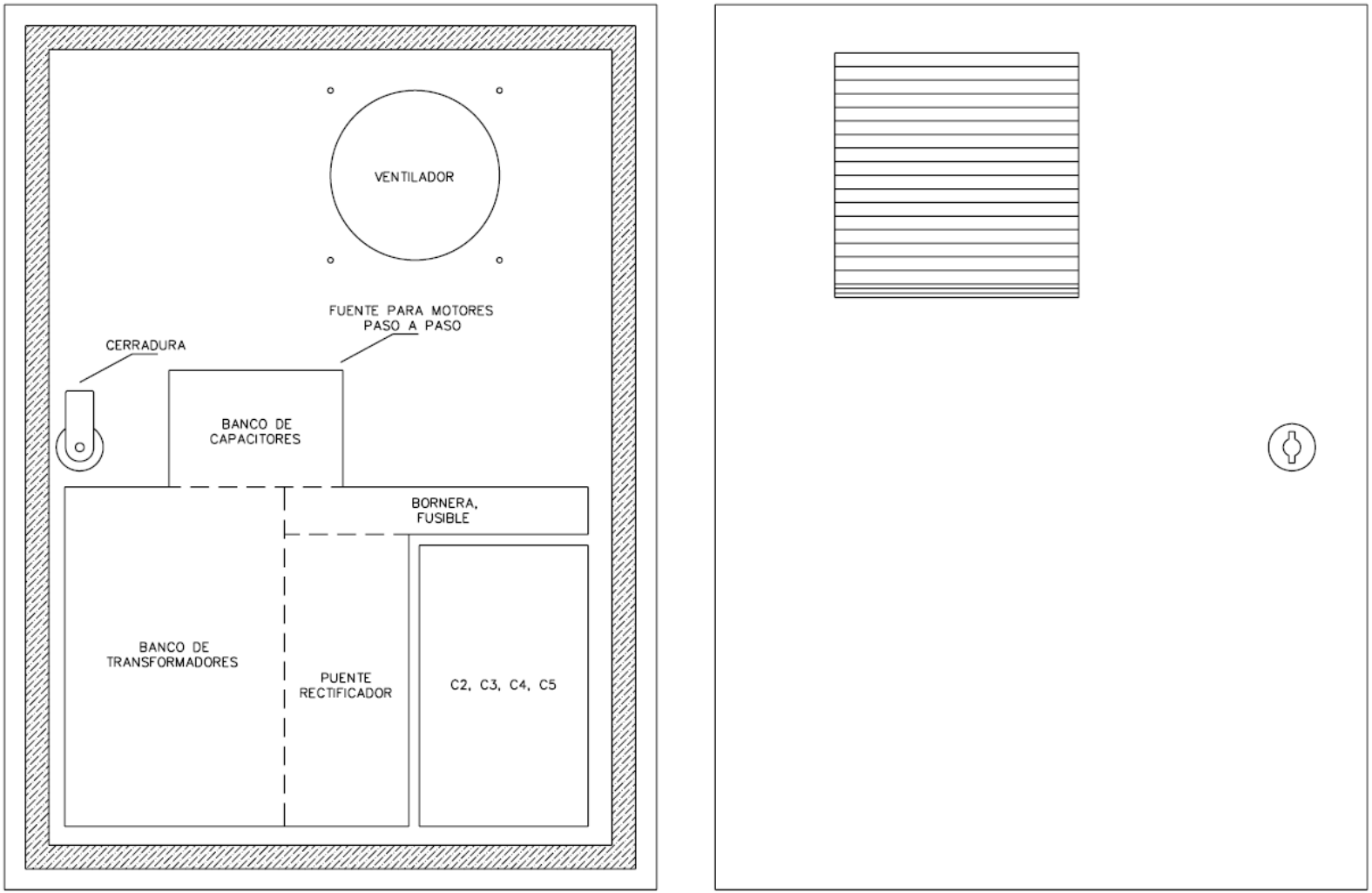


Figura C1.3 (a) Distribución de elementos en puerta de tablero principal, (b) Lado posterior de puerta

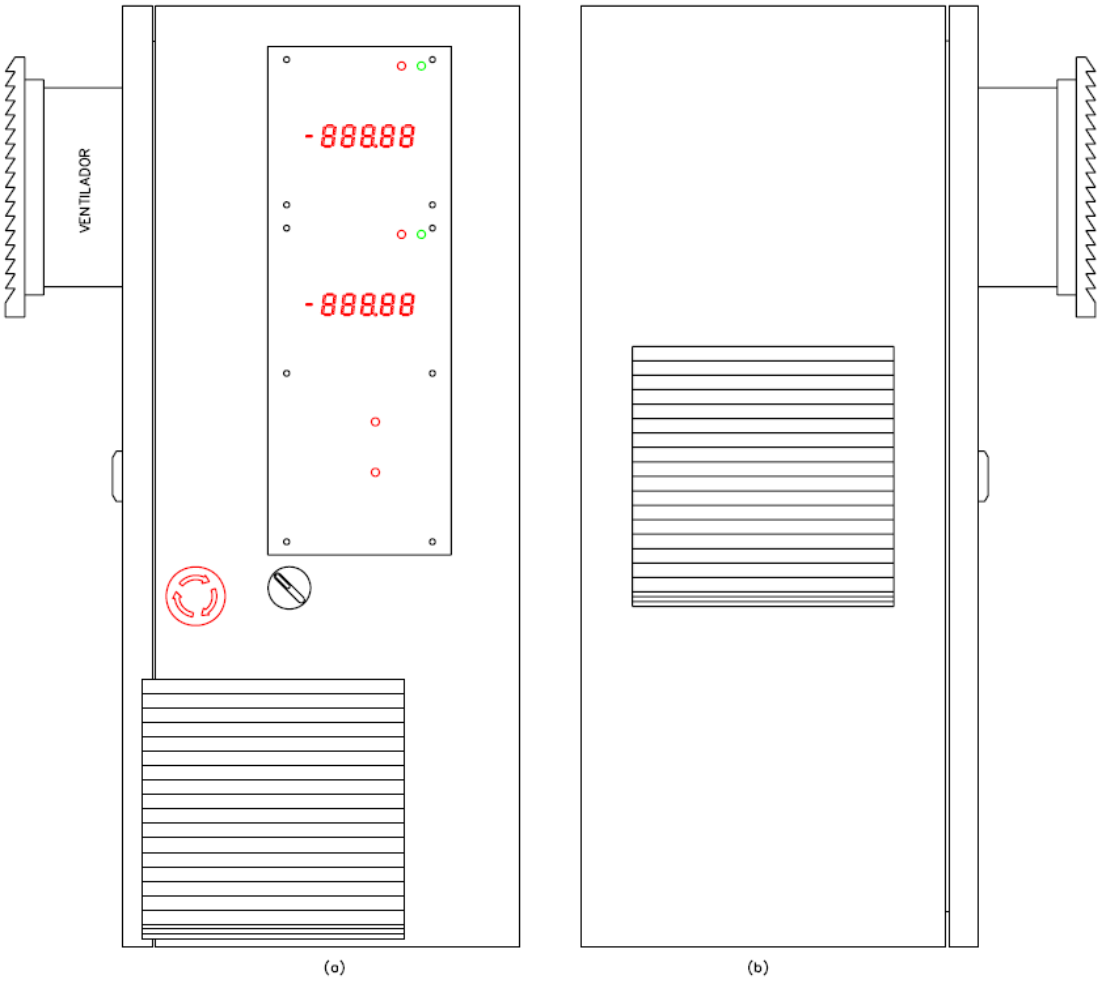


Figura C1.4 (a) Elementos de acceso al operador, visualizadores, puerta cerrada (b) Parte posterior de tablero principal, puerta cerrada

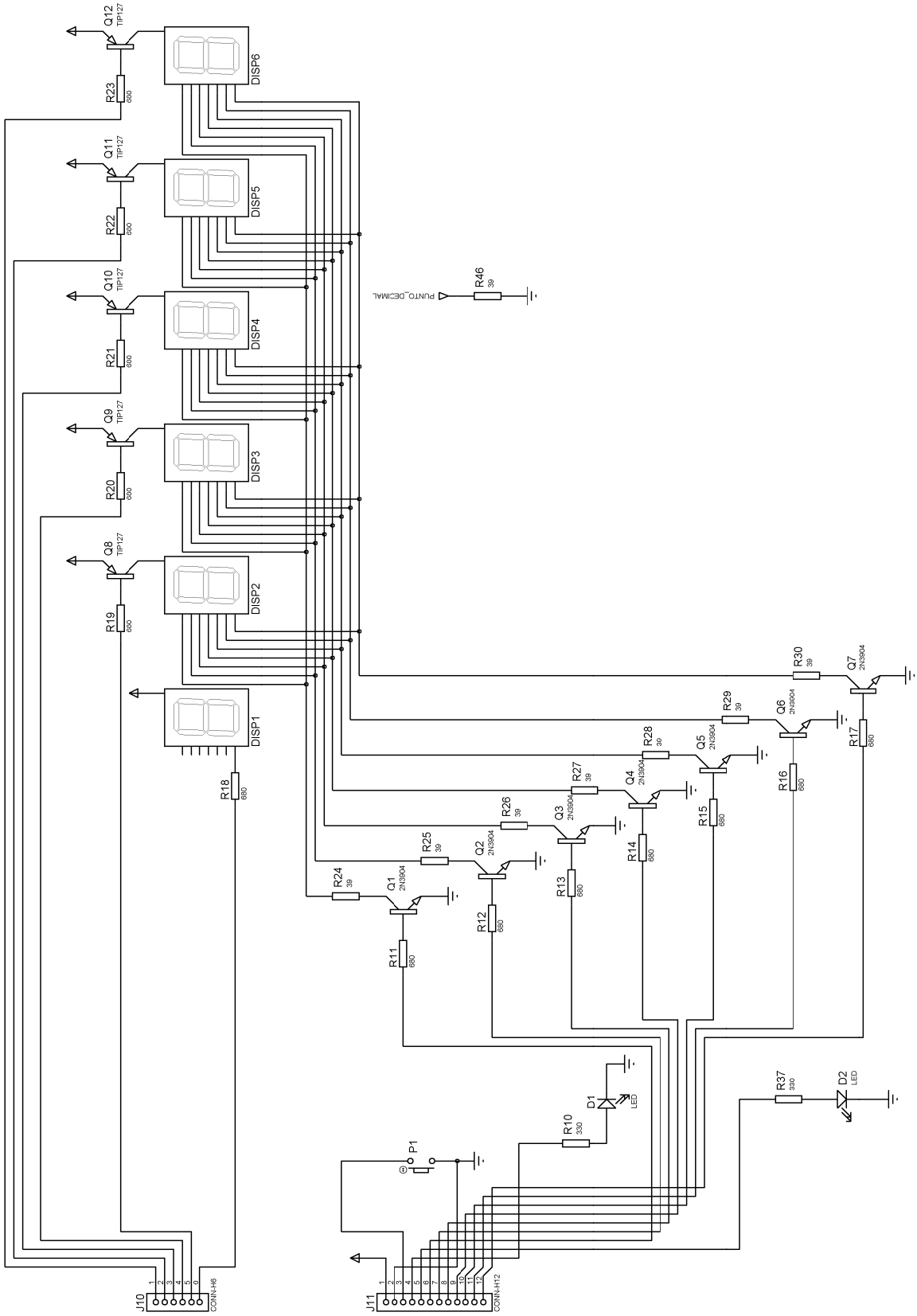


Figura C1.5 Diagrama esquemático CONTROL 1.

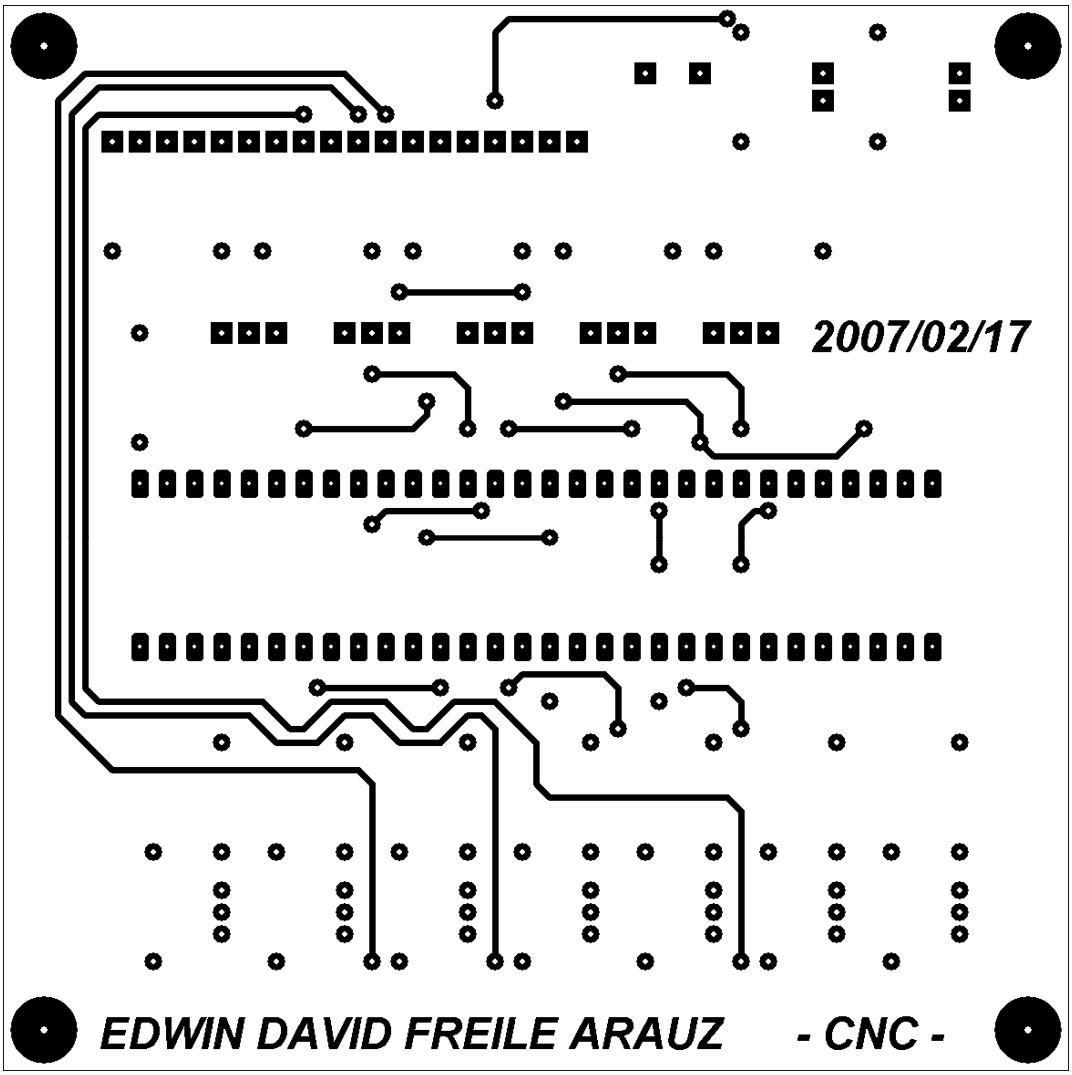


Figura C1.6 Circuito impreso CONTROL 1, lado superior.

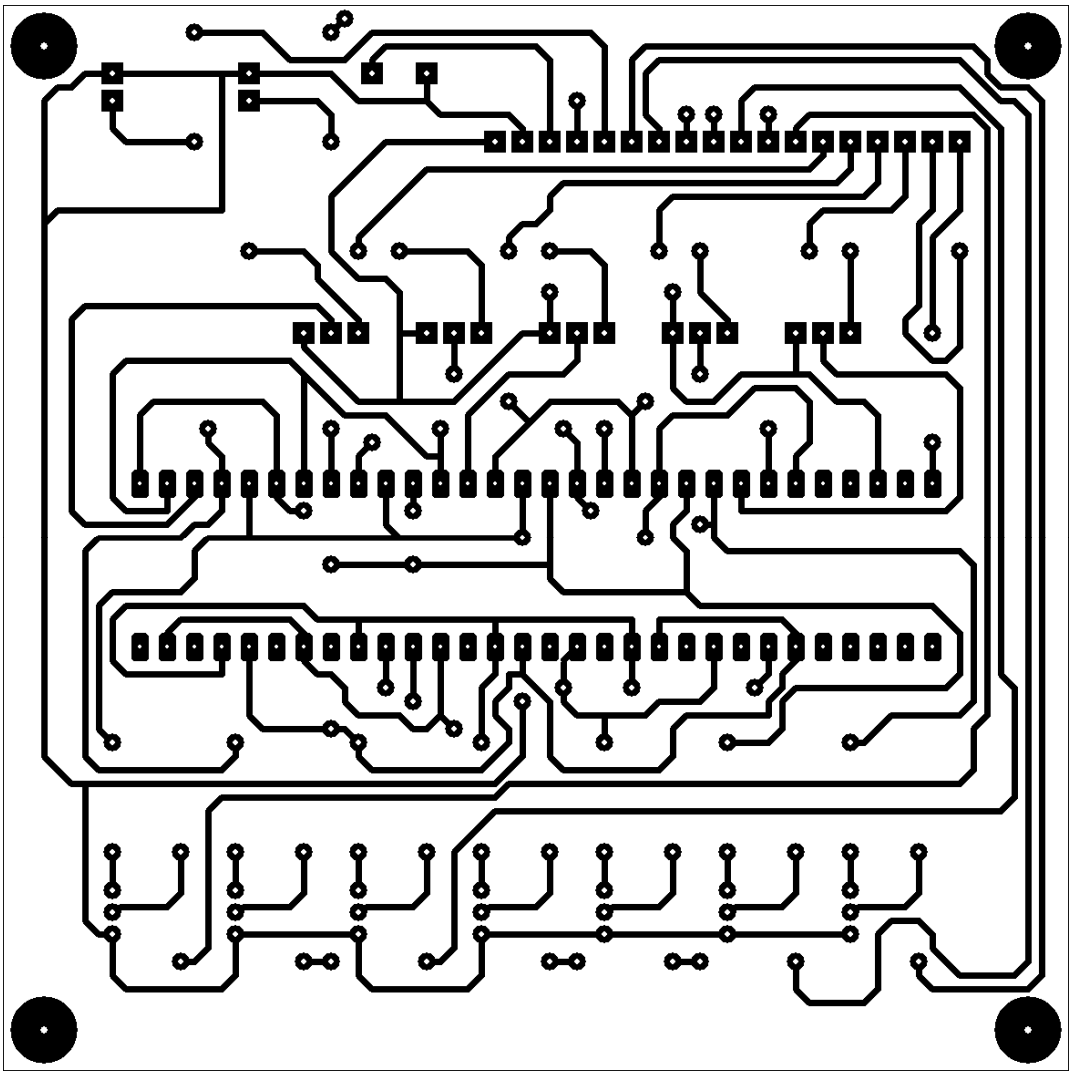


Figura C1.7 Circuito impreso CONTROL 1, lado inferior.

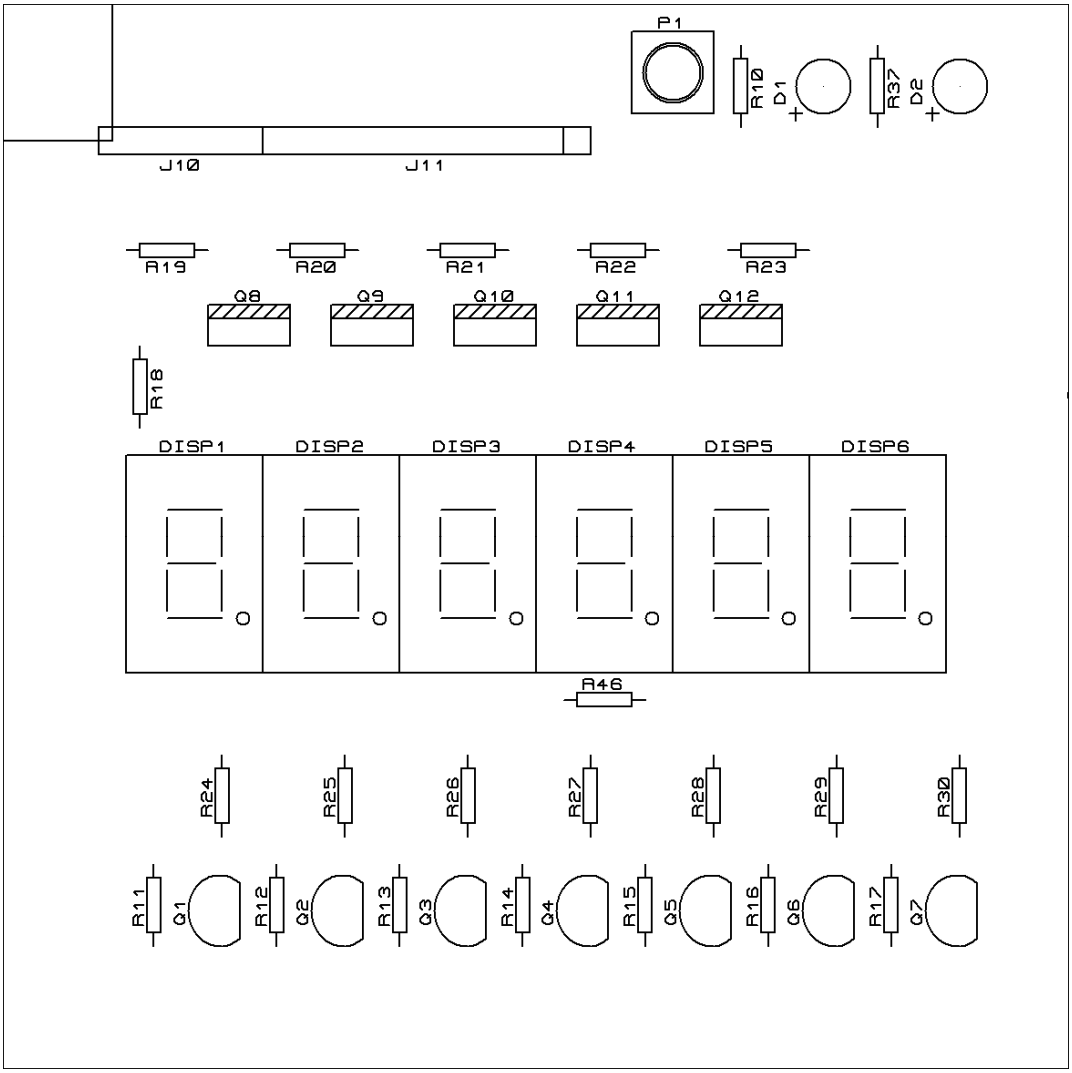


Figura C1.8 Circuito impreso CONTROL 1, distribución de elementos en lado superior.

Tabla C1.1 Listado de elementos, CONTROL 1.

CONTROL 1	
Nomenclatura	VALOR
D1	LED ROJO
D2	LED VERDE
DISP1	Display de 7 segmentos A. C.
DISP2	Display de 7 segmentos A. C.
DISP3	Display de 7 segmentos A. C.
DISP4	Display de 7 segmentos A. C.
DISP5	Display de 7 segmentos A. C.
DISP6	Display de 7 segmentos A. C.
P1	NA PARA MONTAR EN BAQUELITA
Q1	2N3904
Q10	TIP127
Q11	TIP127
Q12	TIP127
Q2	2N3904
Q3	2N3904
Q4	2N3904
Q5	2N3904
Q6	2N3904
Q7	2N3904
Q8	TIP127
Q9	TIP127
R10	330 1/2W
R11	680 1/2W
R12	680 1/2W
R13	680 1/2W
R14	680 1/2W
R15	680 1/2W
R16	680 1/2W
R17	680 1/2W
R18	680 1/2W
R19	680 1/2W
R20	680 1/2W
R21	680 1/2W
R22	680 1/2W
R23	680 1/2W
R24	39 1/2W
R25	39 1/2W
R26	39 1/2W
R27	39 1/2W
R28	39 1/2W
R29	39 1/2W
R30	39 1/2W
R37	330 1/2W
R46	39 1/2W

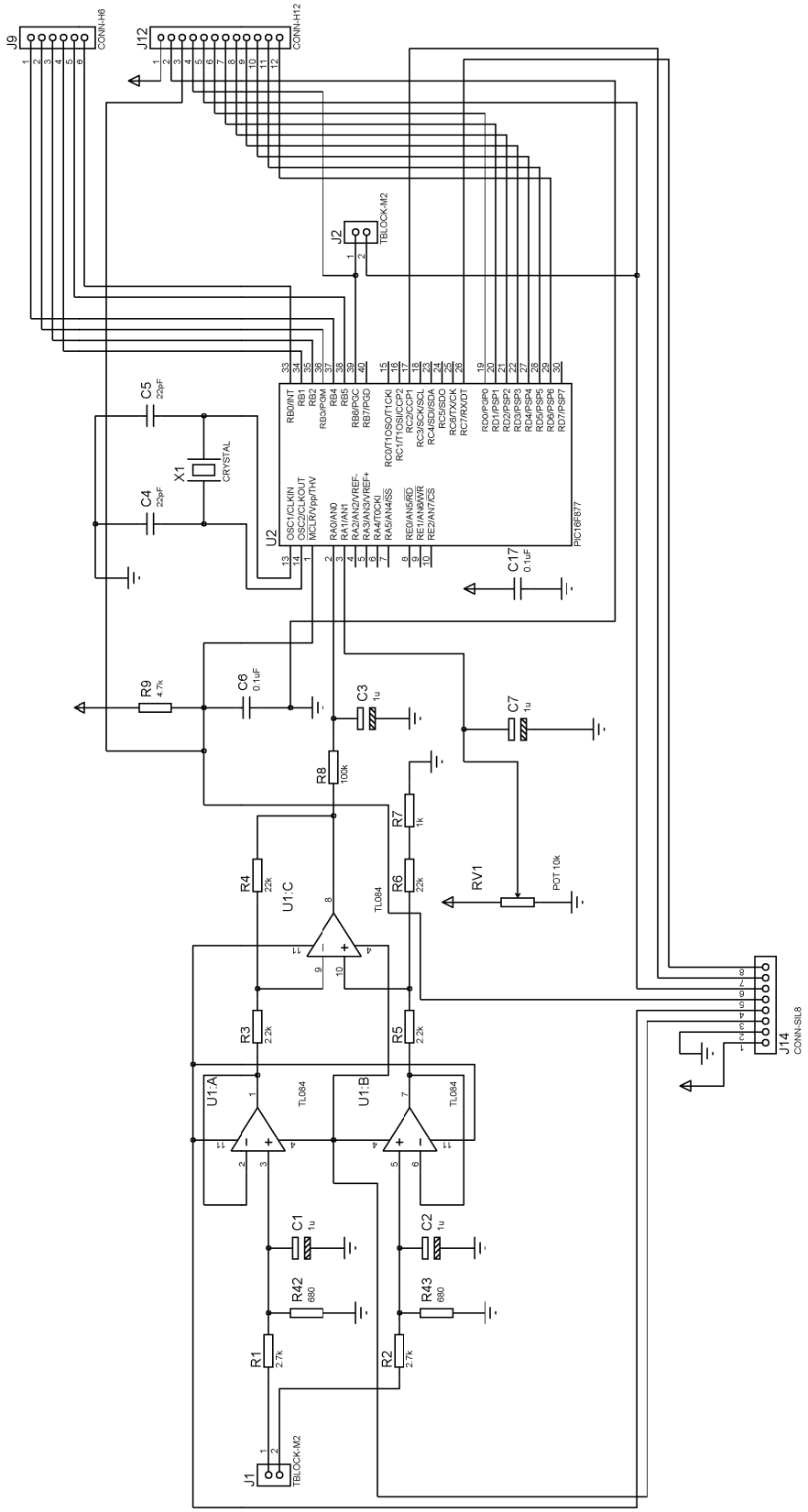


Figura C1.9 Diagrama esquemático CONTROL 2.

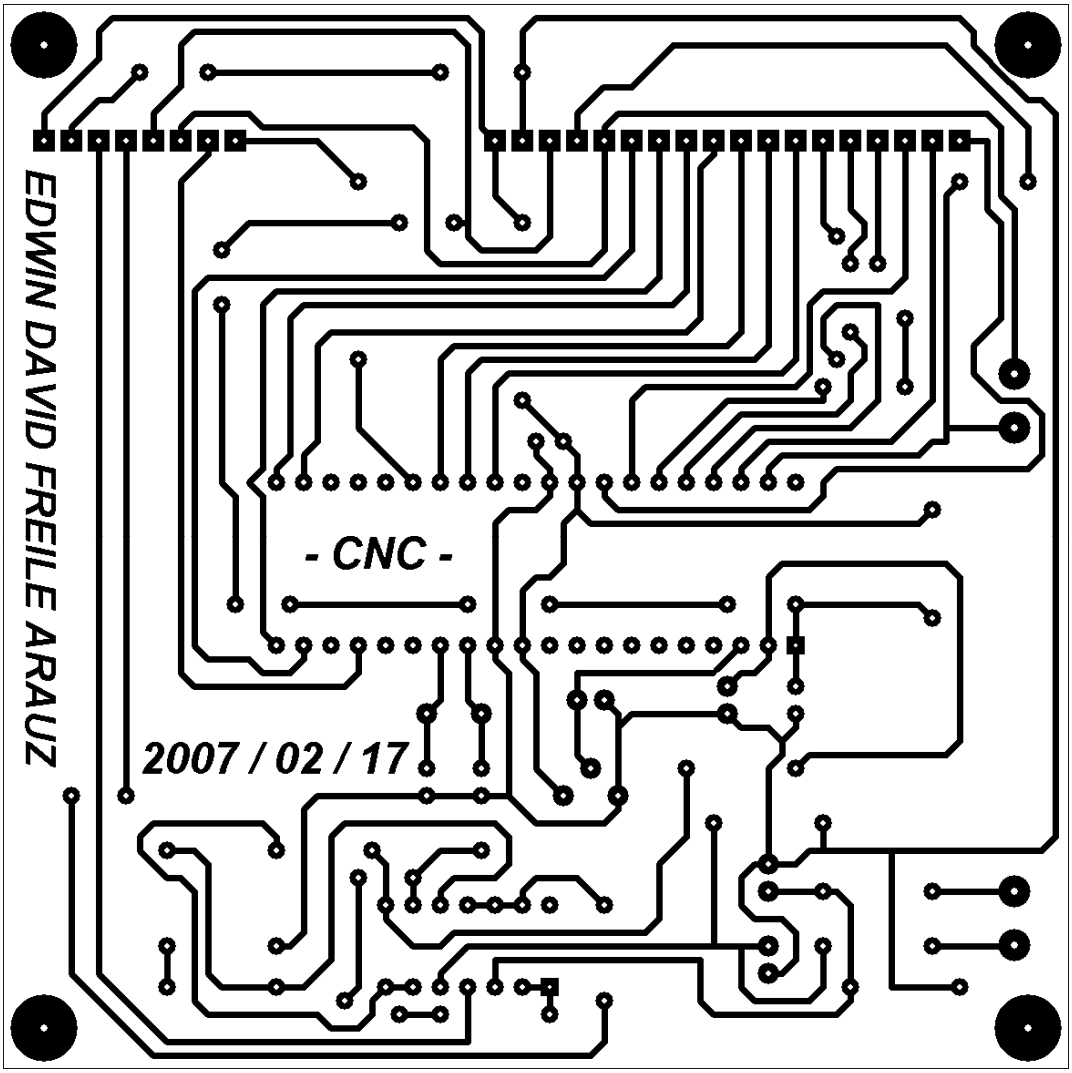


Figura C1.10 Circuito impreso CONTROL 2, lado inferior.

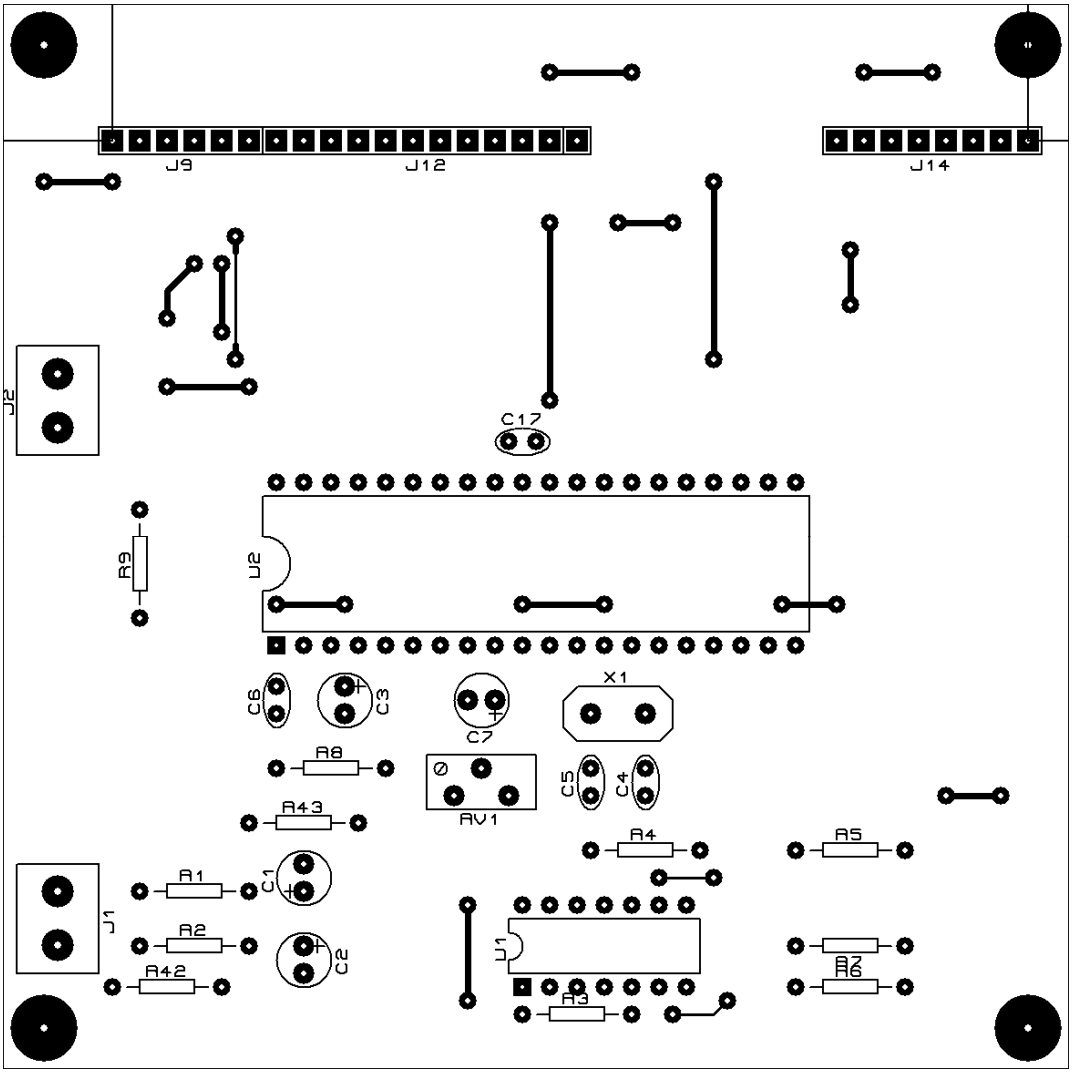


Figura C1.11 Circuito impreso CONTROL 2, distribución de elementos en lado superior.

Tabla C1.2 Listado de elementos, CONTROL 2.

CONTROL 2	
Nomenclatura	VALOR
C1	1uF 16V
C17	0,1uF
C2	1uF 16V
C3	1uF 16V
C4	22pF
C5	22pF
C6	0,1uF
C7	1uF 10V
J1	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J2	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
R1	2,7K 1/2W
R2	2,7K 1/2W
R3	2,2K 1/2W
R4	22K 1/2W
R42	680 1/2W
R43	680 1/2W
R5	2,2K 1/2W
R6	22K 1/2W
R7	1K 1/2W
R8	100K 1/2W
R9	4,7K 1/2W
RV1	10K
U1	TL084
U2	PIC16F877A
X1	20MHz

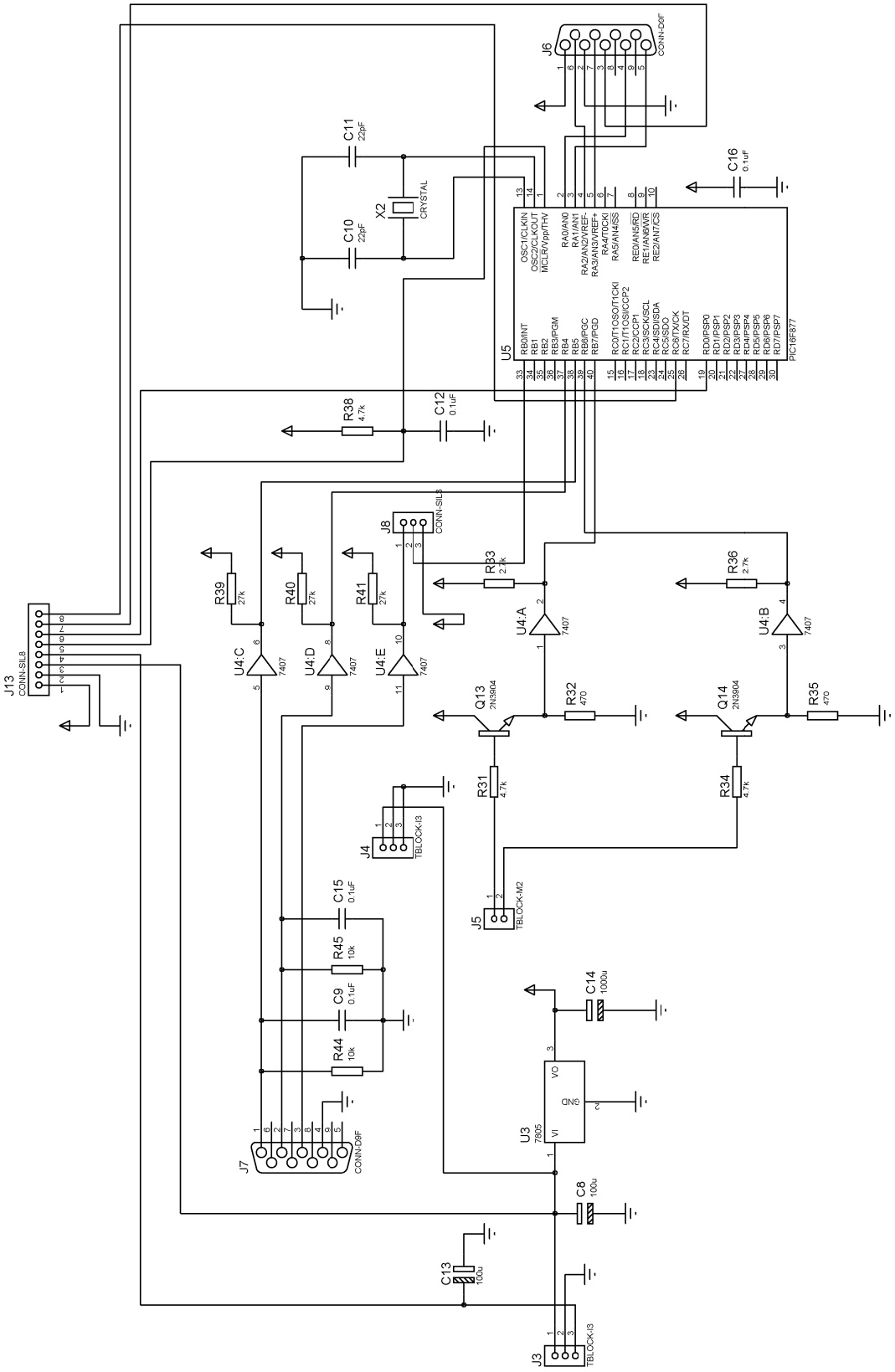


Figura C1.12 Diagrama esquemático CONTROL 3.

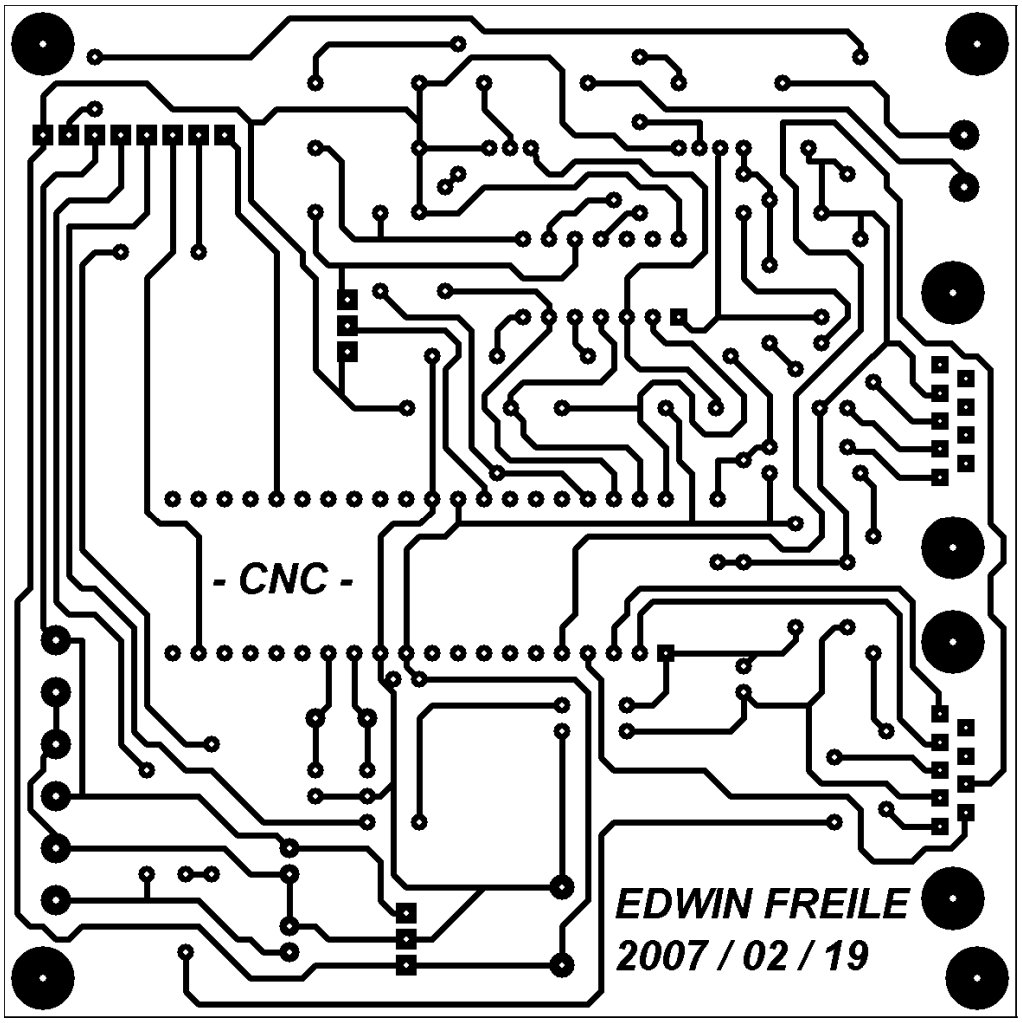


Figura C1.13 Circuito impreso CONTROL 3, lado inferior.

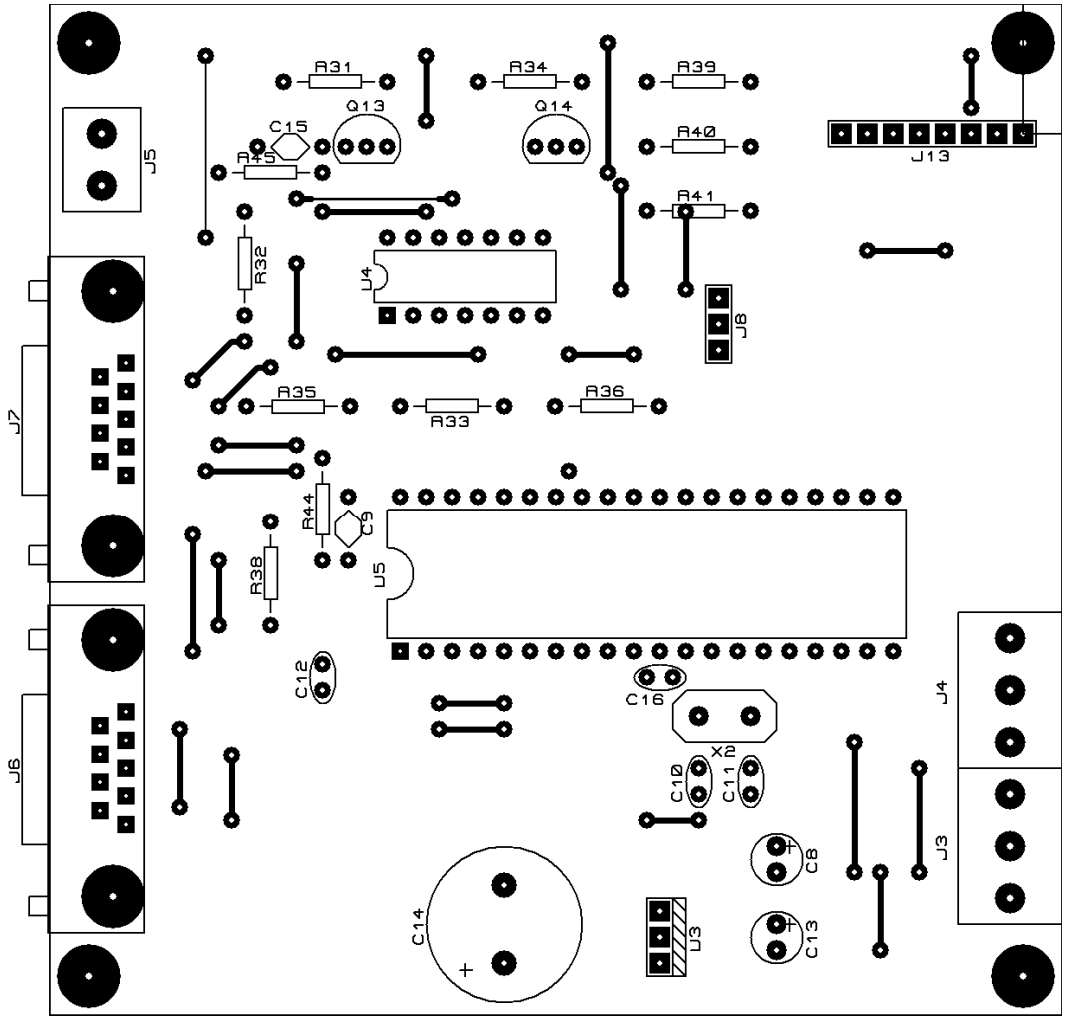


Figura C1.14 Circuito impreso CONTROL 3, distribución de elementos en lado superior.

Tabla C1.3 Listado de elementos, CONTROL 3.

CONTROL 3	
Nomenclatura	VALOR
C10	22pF
C11	22pF
C12	0,1uF
C13	100uF 16V
C14	1000uF 10V
C15	0,1uF
C16	0,1uF
C8	100uF 16V
C9	0,1uF
J3	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M3
J4	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M3
J5	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J6	CONECTOR DB9 HEMBRA PARA MONTAR EN BAQUELITA
J7	CONECTOR DB9 HEMBRA PARA MONTAR EN BAQUELITA
J8	BORNERA PARA JUMPERS P3
Q13	2n3904
Q14	2n3904
R31	4,7K 1/2W
R32	470 1/2W
R33	2,7K 1/2W
R34	4,7K 1/2W
R35	470 1/2W
R36	2,7K 1/2W
R38	4,7K 1/2W
R39	27K 1/2W
R40	27K 1/2W
R41	27K 1/2W
R44	10K 1/2W
R45	10K 1/2W
U3	7805
U4	74LS07
U5	PIC16F877A
X2	20MHz

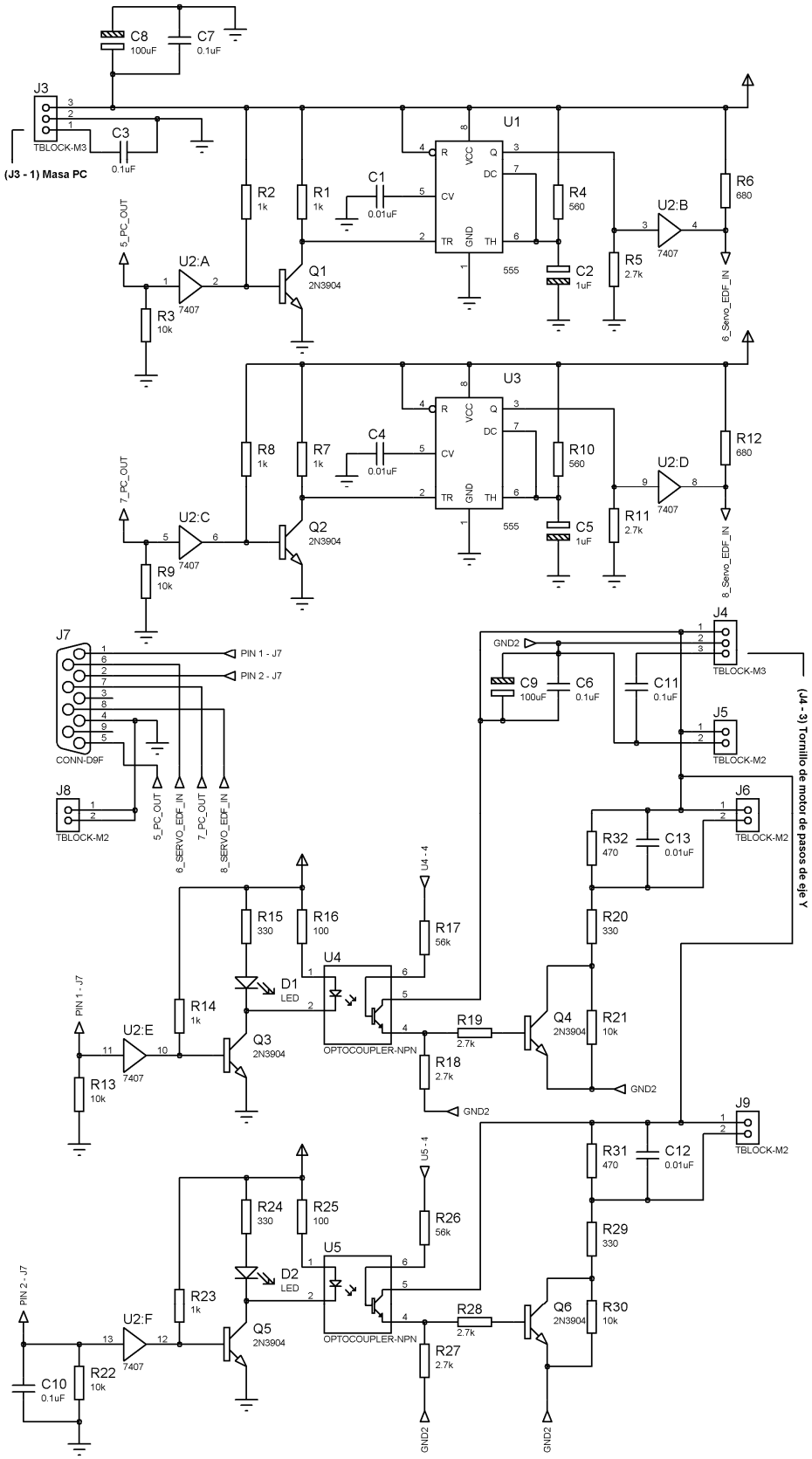


Figura C1.15 Diagrama esquemático INTERFAZ 1.

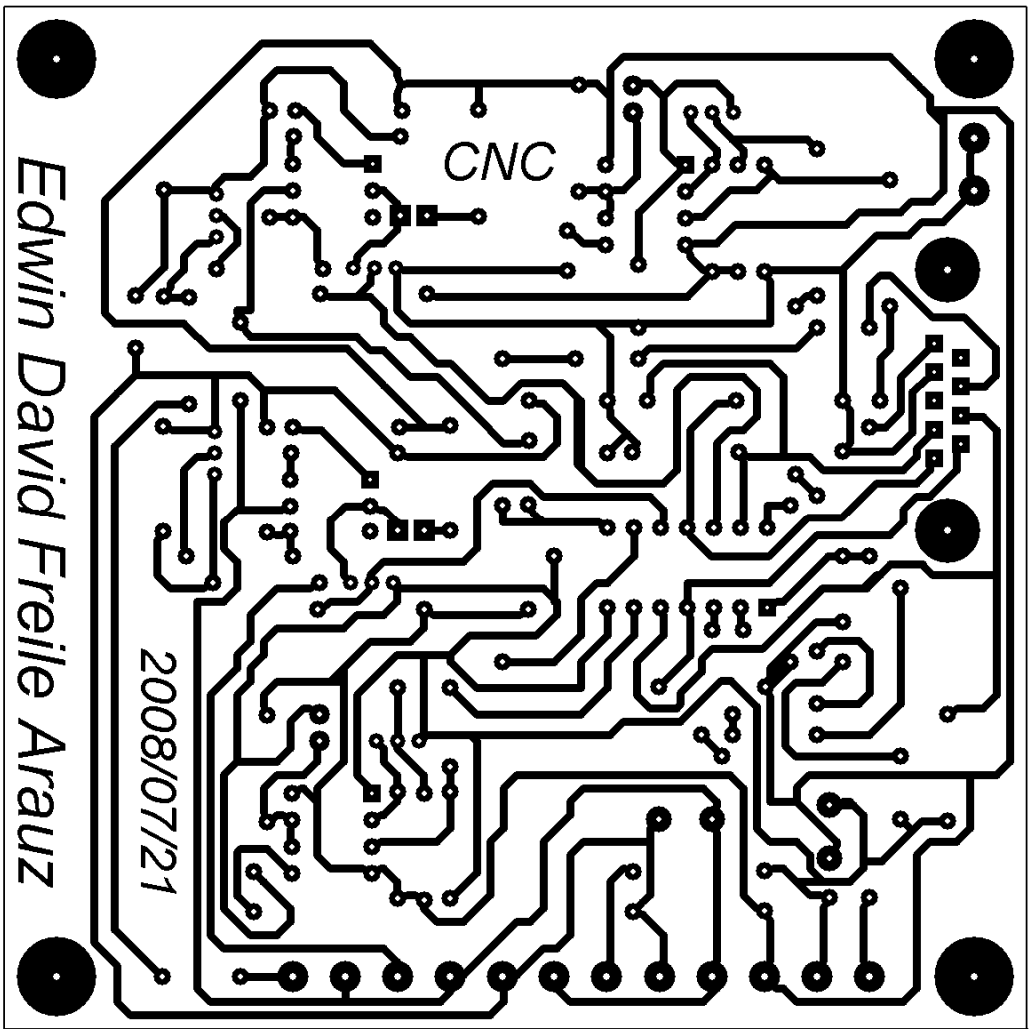


Figura C1.16 Circuito impreso INTERFAZ 1, lado inferior.

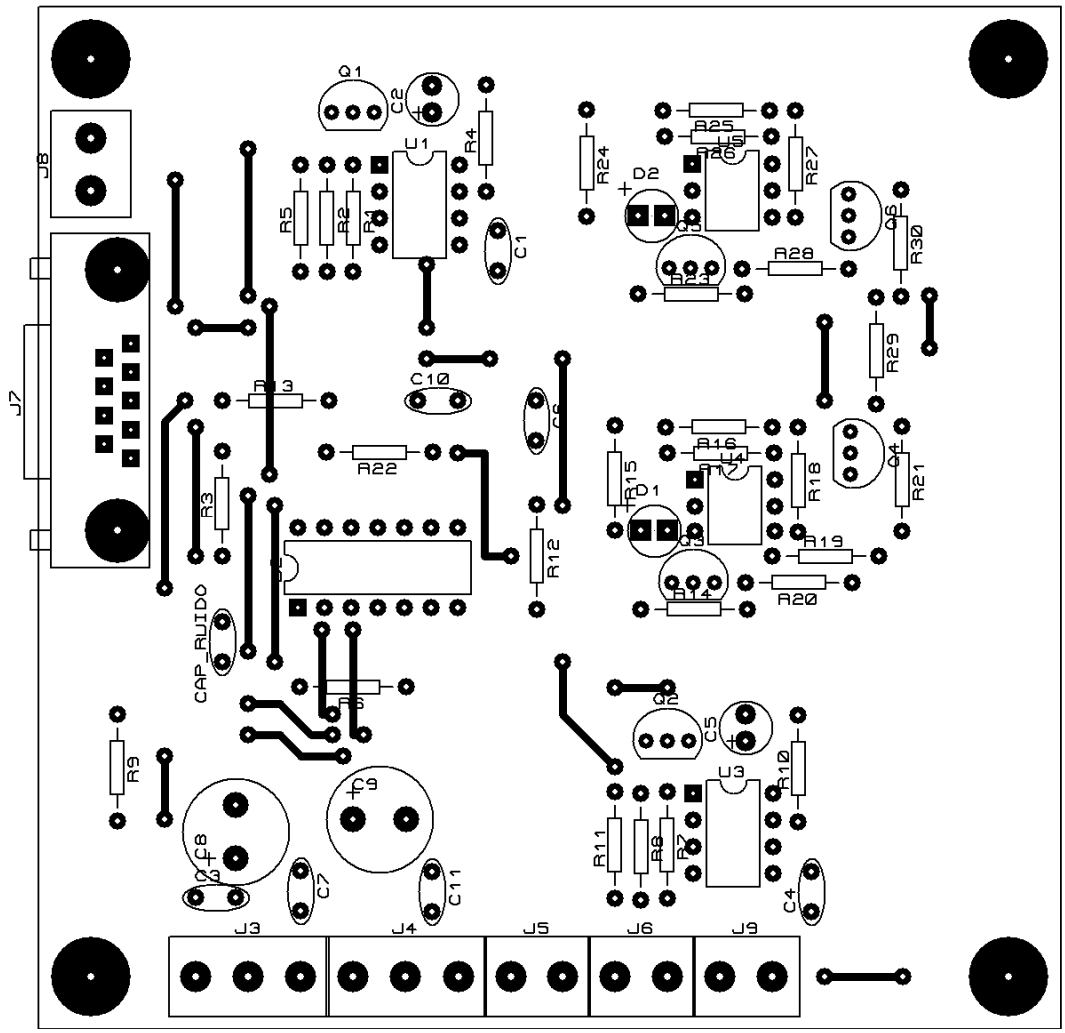


Figura C1.17 Circuito impreso INTERFAZ 1, distribución de elementos en lado superior.

Tabla C1.4 Listado de elementos, INTERFAZ 1.

INTERFAZ 1	
Nomenclatura	VALOR
J3	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M3
C1	0,01uF
C10	0,1uF
C11	0,1uF
C12	0,01uF
C13	0,01uF
C2	1uF 10V
C3	0,1uF
C4	0,01uF
C5	1uF 10V
C6	0,1uF
C7	0,1uF
C8	100uF 10V
C9	100uF 16V
D1	LED ROJO
D2	LED ROJO
J4	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M3
J5	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J6	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J7	CONECTOR DB9 HEMBRA PARA MONTAR EN BAQUELITA
J8	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J9	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
Q1	2N3904
Q2	2N3904
Q3	2N3904
Q4	2N3904
Q5	2N3904
Q6	2N3904
R1	1K 1/2W
R10	560 1/2W
R11	2,7K 1/2W
R12	680 1/2W
R13	10K 1/2W
R14	1K 1/2W

R15	330 1/2W
R16	100 1/2W
R17	56K 1/2W
R18	2,7K 1/2W
R19	2,7K 1/2W
R2	1K 1/2W
R20	330 1/2W
R21	10K 1/2W
R22	10K 1/2W
R23	1K 1/2W
R24	330 1/2W
R25	100 1/2W
R26	56K 1/2W
R27	2,7K 1/2W
R28	2,7K 1/2W
R29	330 1/2W
R3	10K 1/2W
R30	10K 1/2W
R31	470 1/2W
R32	470 1/2W
R4	560 1/2W
R5	2,7K 1/2W
R6	680 1/2W
R7	1K 1/2W
R8	1K 1/2W
R9	10K 1/2W
U1	LM555
U2	7407
U3	LM555
U4	4N25
U5	4N25

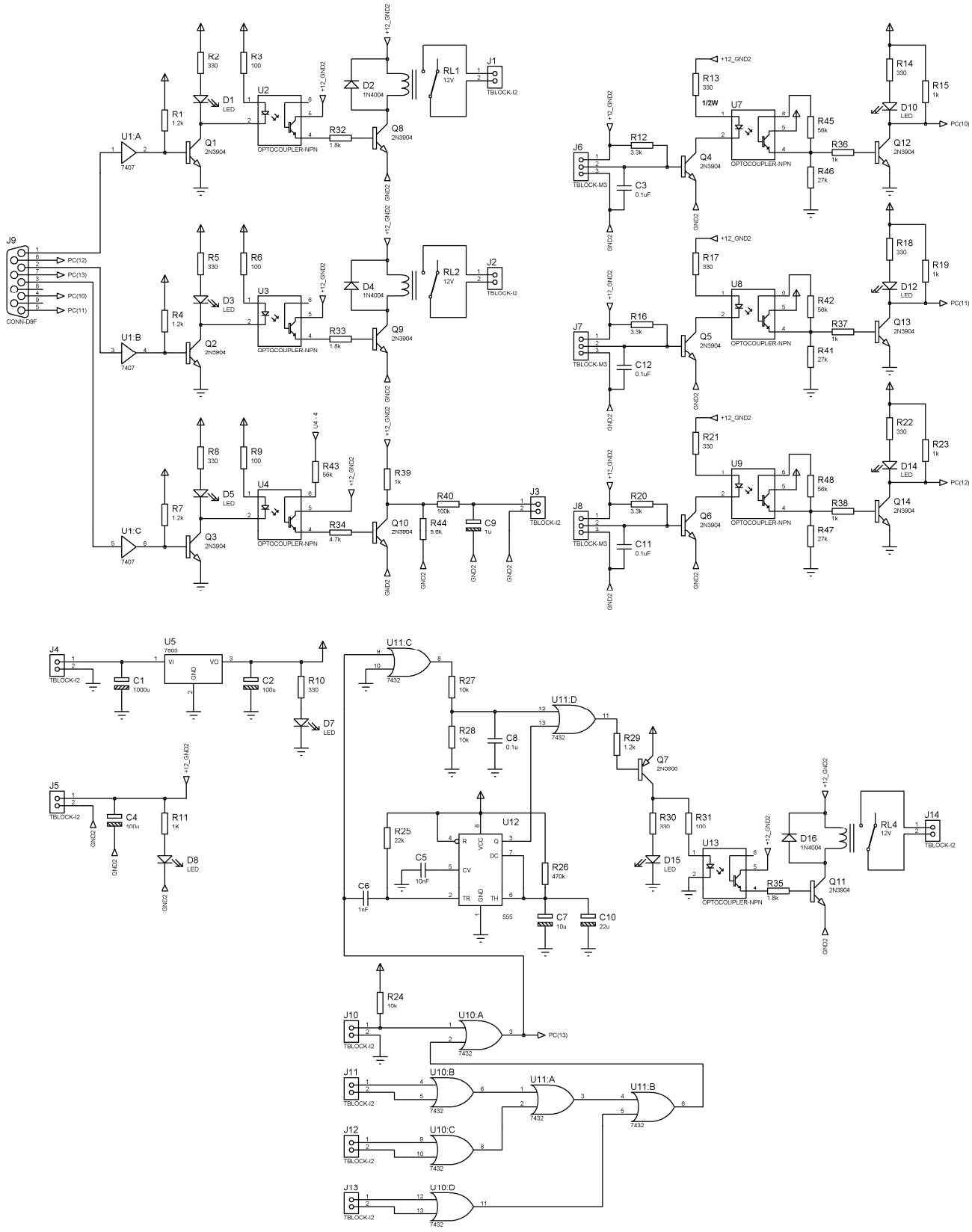


Figura C1.18 Diagrama esquemático INTERFAZ 2.

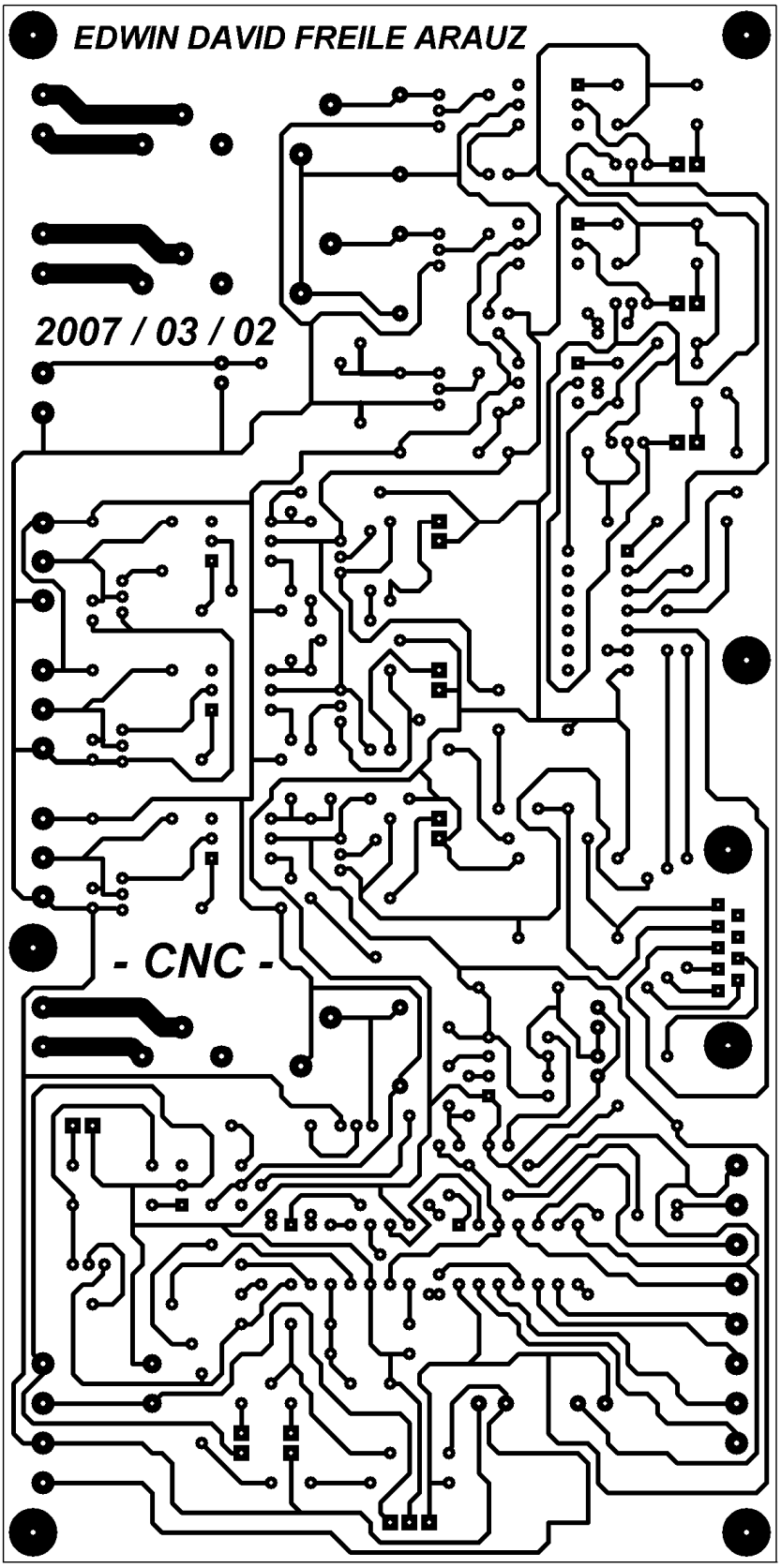


Figura C1.19 Circuito impreso INTERFAZ 2, lado inferior.

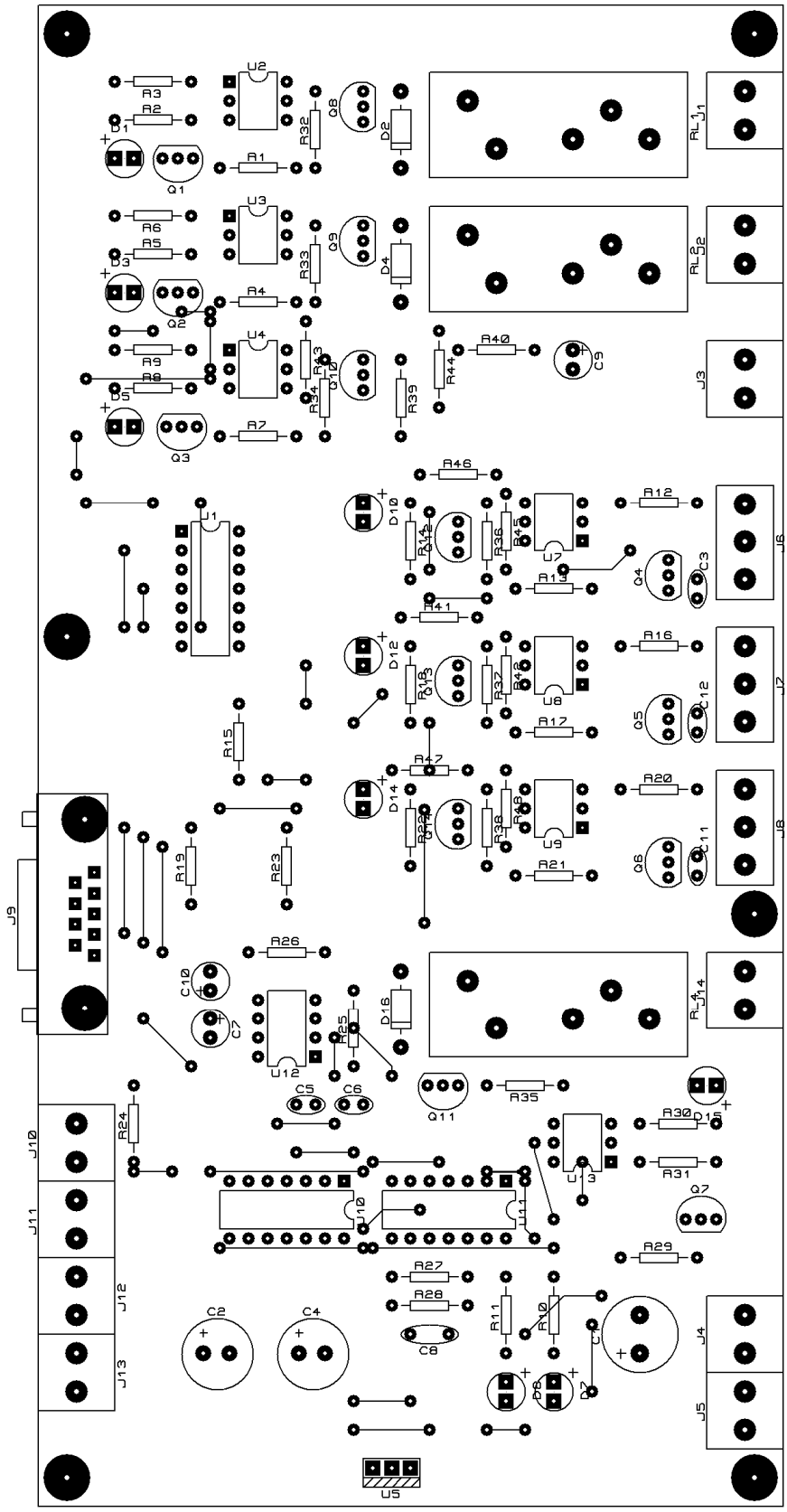


Figura C1.20 Circuito impreso INTERFAZ 2, distribución de elementos en lado superior.

Tabla C1.5 Listado de elementos, INTERFAZ 2.

INTERFAZ 2	
Nomenclatura	VALOR
C1	1000uF 16V
C10	22uF
C11	0,1uF
C12	0,1uF
C2	100uF 10V
C3	0,1uF
C4	100uF 16V
C5	10nF
C6	1nF
C7	10uF
C8	0,1uF
C9	1uF 16V
D1	LED VERDE
D10	LED VERDE
D12	LED VERDE
D14	LED VERDE
D15	LED VERDE
D16	1N4004
D2	1N4004
D3	LED VERDE
D4	1N4004
D5	LED VERDE
D7	LED ROJO
D8	LED AMARILLO
J1	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J10	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J11	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J12	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J13	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J14	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J2	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J3	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J4	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J5	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J6	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M3
J7	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M3
J8	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M3

J9	CONECTOR DB9 HEMBRA PARA MONTAR EN BAQUELITA
Q1	2N3904
Q10	2N3904
Q11	2N3904
Q12	2N3904
Q13	2N3904
Q14	2N3904
Q2	2N3904
Q3	2N3904
Q4	2N3904
Q5	2N3904
Q6	2N3904
Q7	2N3906
Q8	2N3904
Q9	2N3904
R1	1,2K 1/2W
R10	330 1/2W
R11	1K 1/2W
R12	3,3K 1/2W
R13	330 1/2W
R14	330 1/2W
R15	1K 1/2W
R16	3,3K 1/2W
R17	330 1/2W
R18	330 1/2W
R19	1K 1/2W
R2	330 1/2W
R20	3,3K 1/2W
R21	330 1/2W
R22	330 1/2W
R23	1K 1/2W
R24	10K 1/2W
R25	22K 1/2W
R26	470K 1/2W
R27	10K 1/2W
R28	10K 1/2W
R29	1,2K 1/2W
R3	100 1/2W
R30	330 1/2W
R31	100 1/2W
R32	1,8K 1/2W

R33	1,8K 1/2W
R34	4,7K 1/2W
R35	1,8K 1/2W
R36	1K 1/2W
R37	1K 1/2W
R38	1K 1/2W
R39	1K 1/2W
R4	1,2K 1/2W
R40	100K 1/2W
R41	27K 1/2W
R42	56K 1/2W
R43	56K 1/2W
R44	5,6K 1/2W
R45	56K 1/2W
R46	27K 1/2W
R47	27K 1/2W
R48	56K 1/2W
R5	330 1/2W
R6	100 1/2W
R7	1,2K 1/2W
R8	330 1/2W
R9	100 1/2W
RL1	Relé 12V
RL2	Relé 12V
RL4	RELE 12V
U1	7407
U10	7432
U11	7432
U12	LM555
U13	4N25
U2	4N25
U3	4N25
U4	4N25
U5	7805
U7	4N25
U8	4N25
U9	4N25

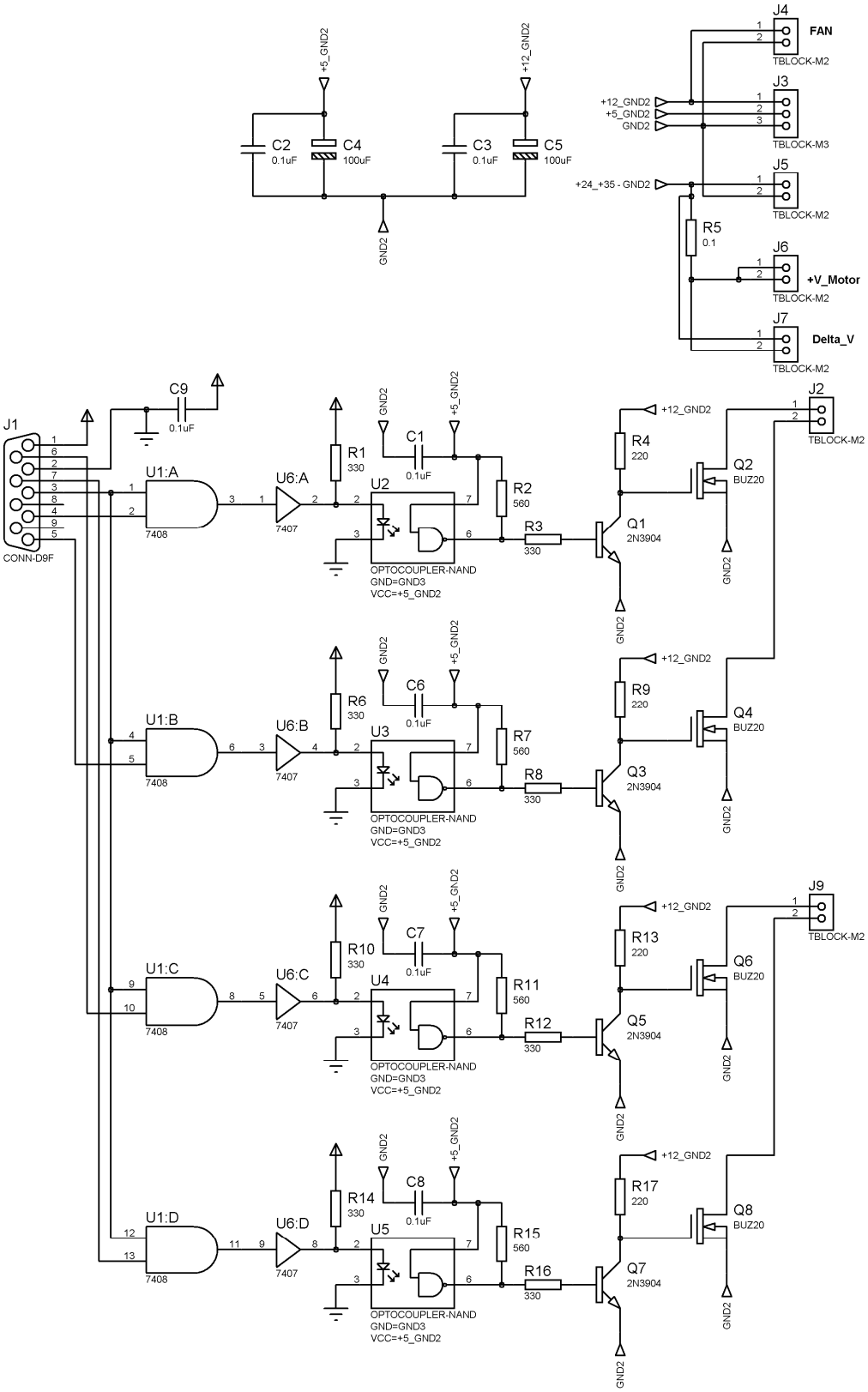


Figura C1.21 Diagrama esquemático POTENCIA.

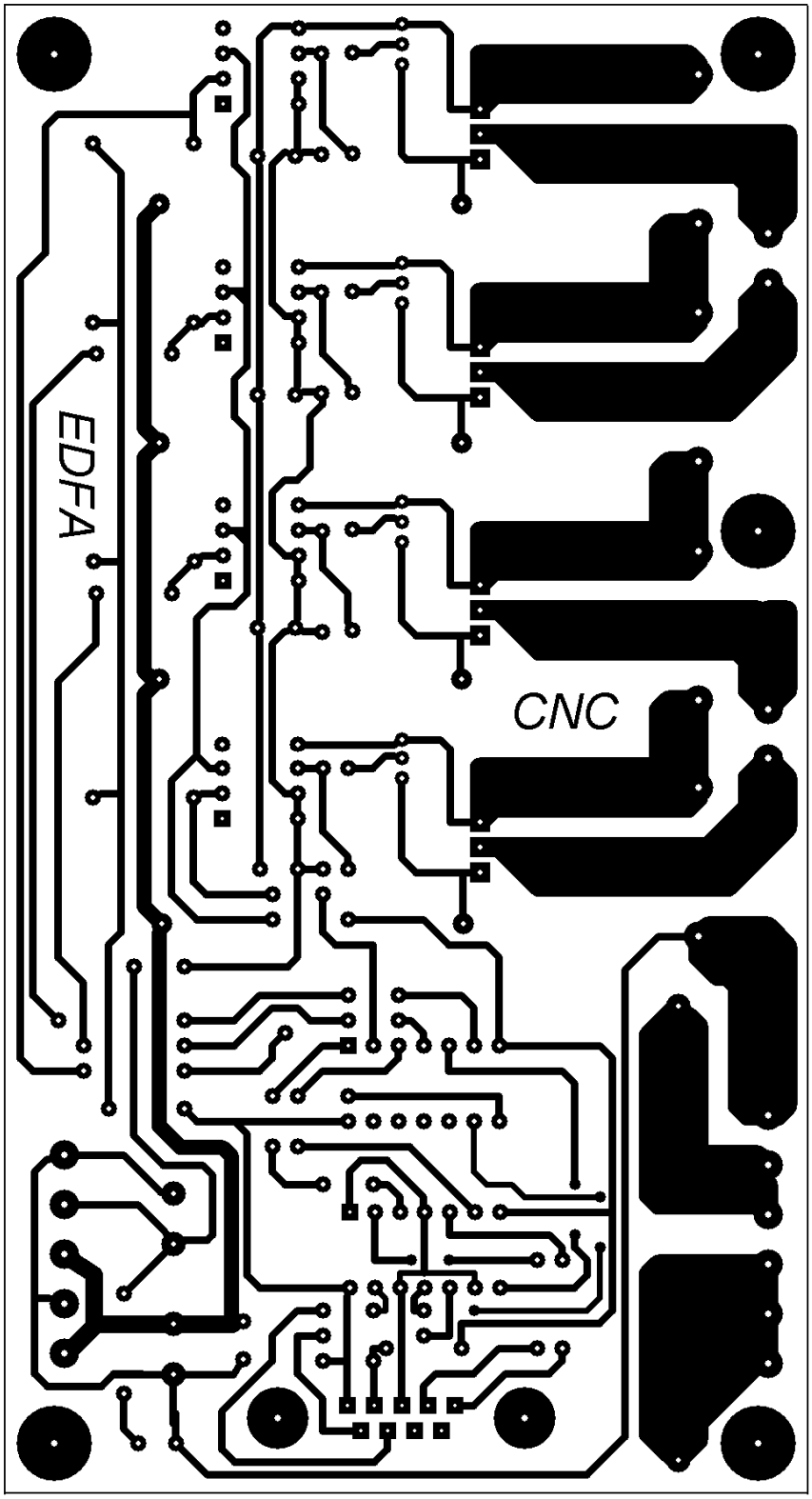


Figura C1.22 Circuito impreso POTENCIA, lado inferior.

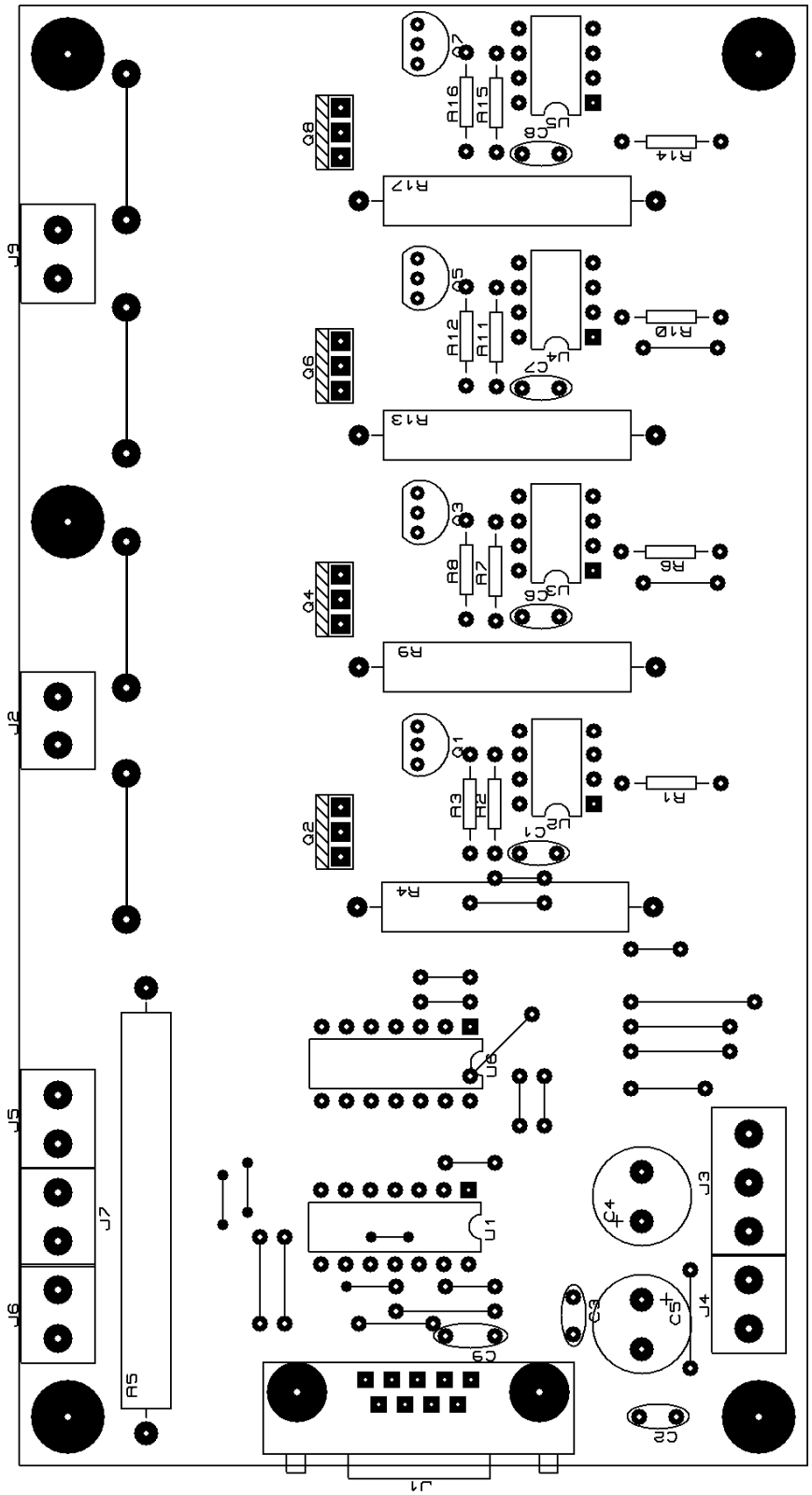


Figura C1.23 Circuito impreso POTENCIA, distribución de elementos en lado superior.

Tabla C1.6 Listado de elementos, POTENCIA.

POTENCIA	
Nomenclatura	VALOR
C1	0,1uF
C2	0,1uF
C3	0,1uF
C4	100uF 10V
C5	100uF 16V
C6	0,1uF
C7	0,1uF
C8	0,1uF
C9	0,1uF
J1	CONECTOR DB9 HEMBRA PARA MONTAR EN BAQUELITA
J2	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J3	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M3
J4	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J5	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J6	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J7	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
J9	BORNERA DE TORNILLO PARA MONTAR EN BAQUELITA M2
Q1	2N3904
Q2	NTE66
Q3	2N3904
Q4	NTE66
Q5	2N3904
Q6	NTE66
Q7	2N3904
Q8	NTE66
R1	330 1/2W
R10	330 1/2W
R11	560 1/2W
R12	330 1/2W
R13	220 5W
R14	330 1/2W
R15	560 1/2W
R16	330 1/2W
R17	220 5W
R2	560 1/2W
R3	330 1/2W
R4	220 5W
R5	0,1 10W
R6	330 1/2W
R7	560 1/2W
R8	330 1/2W
R9	220 5W
U1	7408
U2	NTE3087
U3	NTE3087
U4	NTE3087
U5	NTE3087
U6	7407