

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PROGRAMACIÓN DE UN PROTOTIPO DE
MÁQUINA CNC PARA EL FRESADO Y PERFORADO DE PLACAS DE
CIRCUITO IMPRESO PCB

ÁLVARO FERNANDO MOLINA PORTILLA

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2012

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PROGRAMACIÓN DE UN PROTOTIPO DE
MÁQUINA CNC PARA EL FRESADO Y PERFORADO DE PLACAS DE
CIRCUITO IMPRESO PCB

ÁLVARO FERNANDO MOLINA PORTILLA

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de
Ingeniero Electrónico

Director de proyecto
ANDRES CALVACHE GARCÍA
Ingeniero Electrónico

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2012

“Las ideas y conclusiones aportadas en la tesis de grado, son responsabilidad exclusiva de los autores”

Artículo 1, Acuerdo No. 324 de Octubre 11 de 1966, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

San Juan de Pasto, Mayo de 2012

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, por ser luz en el camino

A mis padres, hermanos y tía, por su incondicional apoyo y ayuda.

A los docentes del Departamento de Electrónica.

RESUMEN

EL PRESENTE DOCUMENTO ES EL INFORME FINAL DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS DURANTE EL DESARROLLO DEL PROYECTO DE GRADO "DISEÑO, CONSTRUCCION Y PROGRAMACION DE UN PROTOTIPO DE MAQUINA CNC PARA EL FRESADO Y PERFORADO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO PCB. EL CONTROL NUMERICO COMPUTARIZADO ES UTILIZADO EN MAQUINAS HERRAMIENTAS PARA LA AUTOMATIZACION DE PROCESOS MEDIANTE LA EJECUCION DE COMANDOS PROGRAMADOS EN UN MEDIO DE ALMACENAMIENTO. LAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO SON UTILIZADAS EN INGENIERIA ELECTRONICA CON DOS FINES, CONECTAR ELECTRICAMENTE LOS ELEMENTOS DISPUESTOS SOBRE ELLA Y SERVIR DE SOPORTE MECANICO, YA QUE ESTAN CONSTITUIDAS POR PISTAS DE MATERIAL CONDUCTOR DISPUESTAS SOBRE UN SUSTRATO NO CONDUCTOR. MEDIANTE ESTE PROYECTO SE CONSIGUE ELABORAR EL PROTOTIPO BASICO DE UN SISTEMA DE FRESADO Y PERFORADO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO, UTILIZANDO PARA ELLO EL CONTROL NUMERICO COMPUTARIZADO Y EL DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR, TODO ESTO CON EL FIN DE AUTOMATIZAR EL PROCESO DE ELABORACION DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO EN LOS LABORATORIOS DE INGENIERIA ELECTRONICA DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO.

PALABRAS CLAVE: CNC, FRESADO, PCB, PROTOTIPO, MACH3, KCAM4, CODIGO G.

ABSTRACT

THE PRESENT DOCUMENT IS THE CLOSING REPORT OF THE ACTIVITIES MADE DURING THE DEVELOPMENT OF THE DEGREE PROJECT: "DESIGN, CONSTRUCTION AND PROGRAMMING OF A PROTOTYPE CNC MACHINE FOR MILLING AND DRILLING OF PRINTED CIRCUIT BOARD'S PCB'S". COMPUTER NUMERICAL CONTROL MACHINE TOOL IS USED TO PROCESS AUTOMATION BY SCHEDULED EXECUTION OF COMMANDS IN A STORAGE MEDIA. PRINTED CIRCUIT BOARDS ARE USED IN ELECTRONIC ENGINEERING WITH TWO GOALS, ELECTRICALLY CONNECTING ELEMENTS AND SERVE IT FORTH ON MECHANICAL SUPPORT AS THEY ARE MATERIAL CONSISTING OF CONDUCTOR TRACKS ON A SUBSTRATE NONCONDUCTIVE. UNDER DE DEVELOPMENT OF THIS PROJECT IT WAS POSIBLE TO ELABORATE A BASIC PROTOTYPE OF A SYSTEM BASIC MILLING AND DRILLING OF PRINTED CIRCUIT BOARD'S, USING COMPUTARIZED NUMERICAL CONTROL AND COMPUTER AIDED DESIGN, ALL THIS IN ORDER TO AUTOMATE THE PROCESS OF PREPARATION PRINTED CIRCUIT BOARD'S IN ELECTRONIC ENGINEERING LABORATORIES OF THE NARIÑO UNIVERSITY.

KEY WORDS: CNC, MILLING, PCB, PROTOTYPE, MACH3, KCAM4, G CODE.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	
1. IDENTIFICACIÓN	20
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	20
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
1.3. ALCANCE Y DELIMITACIÓN	21
1.4. OBJETIVO GENERAL	21
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.6. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	21
1.7. MODALIDAD	22
2. MARCO CONCEPTUAL Y CONCEPTOS BÁSICOS	22
2.1. APROXIMACIÓN HISTÓRICA	23
2.2. AUTOMATIZACIÓN	24
2.3. CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO	24
2.4. MÁQUINA POR CONTROL NUMÉRICO	26
2.5. COMPONENTES MÁQUINA CNC	26
2.5.1. La unidad de gobierno	26
2.5.2. Los actuadores	26
2.5.3. Los transductores	27
2.5.4. Portaherramientas	28
2.5.5. El husillo principal	29
2.5.6. Herramientas de fresado	29
2.5.7. Sistema de transmisión	30
2.6. ACTUADORES	31
2.7. MOTOR PASO A PASO	32
2.8. PARAMETROS DE LOS MOTORES PASO A PASO	33
2.9. CONTROL DE LOS MOTORES PASO A PASO	34
2.10. MOTOR PASO A PASO DE IMAN PERMANENTE	35
2.11. MOTOR PASO A PASO DE RELUCTANCIA VARIABLE	36
2.12. MOTOR PASO A PASO HÍBRIDO	37
2.13. ALIMENTACIÓN	38
2.13.1. Secuencias para manejar motores paso a paso bipolares	39
2.13.2. Secuencias para manejar motores paso a paso unipolares	43
3. PROGRAMACION DE CONTROL NUMERICO	43
3.1. ESTRUCTURA DE LA PROGRAMACION	45
3.1.1. Programación estructural	45
3.1.2. Programación abierta	

3.2. CODIGOS DE CONTROL NUMERICO PARA LA FRESADORA	46
3.2.1. Lista de códigos G	46
3.2.2. Lista de códigos M	48
3.3. ANALISIS DE LAS FUNCIONES G	49
3.3.1. G00 Posicionamiento rápido	49
3.3.2. G01 Interpolación lineal	49
3.3.3. G02 y G03 Interpolaciones circulares CNC	49
3.3.4. G05 Arista matada	50
3.3.5. G07 Arista viva	50
3.3.6. G08 Trayectoria circular tangente a la anterior	50
3.3.7. G09 Trayectoria circular definida por tres puntos	51
3.3.8. G10, G11, G12, G13 Imágenes espejo	51
3.3.9. G31 y G32 Guardar recuperar origen de coordenadas	52
3.3.10. G36 Redondeo controlado de aristas	52
3.3.11. G37 Entrada tangencial	53
3.3.12. G38 Salida tangencial	54
3.3.13. G39 Achaflanado	54
3.3.14. G40, G41 y G42 Compensación de radios de herramienta	55
3.3.15. G53 a G59 Traslados de origen	56
3.3.16. G72 Factor de escalado	56
3.3.17. G73 Rotación del sistema de coordenadas	56
3.3.18. G81 Taladrado	57
3.3.19. G83 Taladrado profundo	58
3.3.20. G87 Cajera rectangular	58
3.3.21. G88 Cajera circular	59
3.4. PUERTO PARALELO	59
3.4.1. Descripción del conector físico	60
3.5. SOFTWARE MACH3	62
3.6. SOFTWARE KCAM	63
3.7. SOFTWARE EAGLE PCB DESING	63
4. DESARROLLO PRELIMINAR	65
4.1. MECÁNICA	65
4.2. INTERFAZ	66
4.3. DRIVERS DE CONTROL Y POTENCIA	67
4.4. SOFTWARE DE CONTROL NUMÉRICO	67
4.5. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	67
5. DISEÑO PROTOTIPO MÁQUINA CNC	69
5.1. EQUIPO DE COMPUTO	69
5.2. INTERFAZ PC-MAQUINA CNC	71
5.3. DRIVER'S MOTORES PASO A PASO	76
5.4. CONFIGURACION SOFTWARE	80
5.4.1. Mach3	80
5.4.2. Kcam4	84

5.4.3. Pcbgcode	86
6. PRUEBAS	88
6.1. PRUEBAS DE COMUNICACIÓN SOFTWARE MACH3 Y KCAM	88
6.2. PRUEBAS DE INTERFAZ	88
6.3. PRUEBA DE DRIVER'S DE MOTORES	89
6.4. PRUEBAS CONJUNTAS	89
7. ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL SISTEMA	91
8. CONCLUSIONES	93
9. RECOMENDACIONES	95
BIBLIOGRAFIA	
ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

	Pág.	
FIGURA 1	PORTAHERRAMIENTAS	28
FIGURA 2	TORNILLO SINFIN CON TUERCA DE BOLAS	30
FIGURA 3	MOTOR PASO A PASO	31
FIGURA 4	ROTOR Y ESTATOR EN UN MOTOR PAP	31
FIGURA 5	DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SIST. PAP	33
FIGURA 6	PRINCIPIO FUNCIONAMIENTO MOTOR PAP	34
FIGURA 7	PRINCIPIO FUN. MOTOR PAP IMAN PERMANEN	34
FIGURA 8	ESQUEMA FUN. MOTOR PAP RELUCTANCIA	35
FIGURA 9	VISTA ISOMETRICA MOTOR HIBRIDO	36
FIGURA 10	SECCION TRANSVERSAL MOTOR PAP HIBRIDO	36
FIGURA 11	PUENTE H	38
FIGURA 12	ESTRUCTURA DE UN BLOQUE DE PROGRAMACION	44
FIGURA 13	G08 TRAYECTORIA CIRCULAR TANGENTE A LA ANTERIOR	51
FIGURA 14	G09 TRAYECTORIA CIRCULAR DEFINIDA POR TRES PUNTOS	51
FIGURA 15	G10, G11, G12, G13 IMAGENES ESPEJO	52
FIGURA 16	G36 REDONDEO CONTROLADO DE ARISTAS	53
FIGURA 17	G37 ENTRADA TANGENCIAL	53
FIGURA 18	G38 SALIDA TANGENCIAL	54
FIGURA 19	G39 ACHAFLANADO	55
FIGURA 20	G73 ROTACION EL SISTEMA DE COORDENADAS	57
FIGURA 21	CONECTORES DB25 MACHO Y HEMBRA	59
FIGURA 22	ARQUITECTURA PUERTO PARALELO	60
FIGURA 23	DESCRIPCION DE PINES PUERTO PARALELO	61
FIGURA 24	VENTANA DE INICIO MACH3	63
FIGURA 25	PANTALLA BIENVENIDA KCAM	63
FIGURA 26	DISEÑO PCB EN EAGLE	64
FIGURA 27	DIAGRAMA DE BLOQUES MECANICA EJE "X" "Y"	65
FIGURA 28	DIAGRAMA DE BLOQUES MECANICA EJE "Z"	66
FIGURA 29	DIAGRAMA DE BLOQUES ENLACE	66
FIGURA 30	DIAGRAMA DE BLOQUES CONTROL Y POTENCIA	67
FIGURA 31	DIAGRAMA DE BLOQUES SIST ALIMENTACION	68
FIGURA 32	DIAGRAMA DE BLOQUES MAQUINA CNC	69
FIGURA 33	PRUEBA FUNCIONAMIENTO PUERTO PARALELO	70
FIGURA 34	DIAGRAMA DE BLOQUES INTERFAZ PC-MAQUINA CNC	71
FIGURA 35	FORMA DE ONDA PROVENIENTE DEL SOFTWARE MACH3	72

FIGURA 36	CONFIGURACION DE PINES IDC10H	73
FIGURA 37	CONFIGURACION DE PINES PUERTO PARALELO	73
FIGURA 38	SIMULACION 3D PLACA INTERFAZ	74
FIGURA 39	DIAGRAMA ESQUEMATICO INTERFAZ PC- MAQUINA CNC	75
FIGURA 40	DIAGRAMA DE BLOQUES DRIVERS MOTORES	76
FIGURA 41	DIAGRAMA INTERNO L297	77
FIGURA 42	DETALLE CONTROL DE CORRIENTE DE CARGA	78
FIGURA 43	SIMULACION 3D PLACA DRIVER	79
FIGURA 44	DIAGRAMA ESQUEMATICO DRIVER'S MOTORES	79
FIGURA 45	CONFIGURACION GENERAL MACH3	80
FIGURA 46	CONFIGURACION DE PUERTO	81
FIGURA 47	CONFIGURACION DE SALIDA DE LOS MOTORES	81
FIGURA 48	CONFIGURACION SEÑALES DE ENTRADA	82
FIGURA 49	CONFIGURACION SEÑALES DE SALIDA	82
FIGURA 50	CONFIGURACION TUNEADO DE MOTORES	83
FIGURA 51	VENTANA DE BIENVENIDA KCAM	84
FIGURA 52	CONFIGURACION DE EJES	84
FIGURA 53	CONFIGURACION DE PUERTOS	85
FIGURA 54	CONFIGURACION DE SALIDAS	85
FIGURA 55	CONFIGURACION GENERAL ULP	86
FIGURA 56	CONFIGURACION DE MAQUINA	86

LISTA DE TABLAS

		Pág.
TABLA 1	EVOLUCION CNC	22
TABLA 2	VALORES TIPICOS DE NUMERO DE PASOS POR VUELTA EN MORORES PAP	32
TABLA 3	SECUENCIA DE CONTROL EN MOTORES PAP BIPOLARES	39
TABLA 4	SECUENCIA DE CONTROL DE MOTORES PAP EN MODO NORMAL	39
TABLA 5	SECUENCIA CONTROL DE MOTORES PAP EN MODO WAVE DRIVE	40
TABLA 6	SECUENCIA CONTROL DE MOTORES PAP EN MODO MEDIO PASO	41
TABLA 7	EJEMPLO DE PROGRAMACION ESTRUCTURAL	45
TABLA 8	EJEMPLO DE PROGRAMACION ABIERTA	45
TABLA 9	LISTA DE CODIGOS G	46
TABLA 10	LISTA DE FUNCIONES M	48
TABLA 11	DETALLE DE PINES EN EL PUERTO PARALELO	61
TABLA 12	ESPECIFICACIONES TECNICAS	91

LISTA DE ANEXOS

	Pág.	
ANEXO A	PLANIMETRIA VISTA EN PLANTA	98
ANEXO B	PLANIMETRIA VISTA FRONTAL	99
ANEXO C	PLANIMETRIA VISTA POSTERIOR	100
ANEXO D	PERSPECTIVA VISTA FRONTAL	101
ANEXO E	PERSPECTIVA VISTA POSTERIOR	102
ANEXO F	VISTAS CARTESIANAS	103
ANEXO G	PLACA TERMINADA INTERFAZ	104
ANEXO H	DISEÑO PCB INTERFAZ	105
ANEXO I	PLACA TERMINADA DRIVER	106
ANEXO J	DISEÑO PCB DRIVER	107
ANEXO K	VISTAS DE DETALLE	108

GLOSARIO

AUTOMATIZACIÓN: es el uso de sistemas o elementos computarizados y electromecánicos para controlar maquinarias y/o procesos industriales sustituyendo a operadores humanos.

CÓDIGO G: Las funciones preparatorias, también conocidas como G-Codes o Códigos G, son las más importantes en la programación CNC, ya que controlan el modo en que la máquina va a realizar un trazado, o el modo en que va a desplazarse sobre la superficie de la pieza que está trabajando.

CONTROL NUMÉRICO: es un sistema de automatización de máquinas herramienta, que son operadas mediante comandos programados en un medio de almacenamiento, en comparación con el mando manual mediante volantes o palancas.

FRESADORA: es una máquina herramienta utilizada para realizar mecanizados por arranque de viruta mediante el movimiento de una herramienta rotativa de varios filos de corte denominada fresa.

HARDWARE: corresponde a todas las partes tangibles de un sistema informático sus componentes son: eléctricos, electrónicos, electromecánicos y mecánicos.

HUSILLO: es un tipo de tornillo largo y de gran diámetro, utilizado para accionar los elementos de apriete tales como prensas o mordazas, así como para producir el desplazamiento lineal de los diferentes carros de fresadoras y tornos.

INTERPOLACIÓN: En el sub-campo matemático del análisis numérico, se denomina interpolación a la obtención de nuevos puntos partiendo del conocimiento de un conjunto discreto de puntos.

INTERFAZ: es la conexión entre dos ordenadores o máquinas de cualquier tipo dando una comunicación entre distintos niveles.

KCAM 4: software diseñado para controlar equipos CNC a un bajo costo. Utiliza el código G o la importación de archivos con extensiones de tipo DXF, NC, PLT, etc. para trazar trayectorias en máquinas herramientas.

MATCH 3: es un software que interpreta código G (programa CNC) y envía señales de control a los motores de una máquina CNC.

MOTOR BRUSHLESS: o motor eléctrico sin escobillas, es un motor eléctrico que no emplea escobillas para realizar el cambio de polaridad en el rotor.

MOTOR PASO A PASO: es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa es que es capaz de avanzar una serie de grados (paso) dependiendo de sus entradas de control.

POTENCIA ELÉCTRICA: es la relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un tiempo determinado.

SOFTWARE: corresponde al equipamiento lógico o soporte lógico de un sistema informático; comprende el conjunto de los componentes lógicos necesarios que hacen posible la realización de tareas específicas.

TREN DE ENGRANAJES: se denomina engranaje o ruedas dentadas al conjunto de mecanismos (piñones, engranes, cadenas, bandas) utilizado para transmitir potencia de un componente a otro dentro de una máquina. Un engranaje sirve para transmitir movimiento circular mediante contacto de ruedas dentadas.

TURBO CNC: software para el control de máquinas CNC que se soporta desde DOS, utilizado frecuentemente para controlar las máquinas desde un PC sin gran respaldo de hardware

LISTA DE ACRONIMOS

PCB: Printed Circuit Board (Placa Impresa de Circuito)

CNC: Control Numérico Computarizado

MHCN: Máquina Herramienta de Control Numérico

PC: Personal Computer (Computador Personal)

FET: Fiel Effect Transistor (Transistor de efecto de campo)

AC: Altern Current (Corriente Alterna)

DC: Direct Current (Corriente Directa)

BJT: Bipolar Junction Transistor (Transistor de unión bipolar)

ULP: User Language Program (Lenguaje de Programación de Usuario)

DOS: Disk Operating System (Sistema Operativo de Disco)

CAD: Computer Aided Design (Diseño Asistido por Computadora)

MOSFET: Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor (Transistor de efecto de campo metal-oxido-semiconductor)

CIM: Computer Integrated Manufacturing (Manufactura Integrada por Computadora).

INTRODUCCION

Las máquinas-herramientas de control numérico configuran una tecnología de fabricación de piezas que de la mano de la micro-electrónica, la automática y la informática industrial experimentarán en los próximos años un acelerado desarrollo y una plena incorporación en los procesos productivos, desplazando progresivamente a las máquinas convencionales; su capacidad de trabajo automático y de interacción de los distintos equipos entre sí y con los sistemas de control, planificación y gestión de información, permite que esta tecnología se convierta dentro de poco en la base de otros sistemas de fabricación como el CIM (Computer Integrated Manufacturing).

Actualmente las máquinas CNC se encuentran en una infinidad de aplicaciones a lo largo y ancho del planeta, desde la fabricación de electrodomésticos, pasando por la ebanistería hasta la producción de piezas para automóviles y aviones. Los beneficios de este tipo de tecnología son muchos, tales como: alta precisión en el fresado, permite mecanizar piezas más complejas, alta repetibilidad, los ajustes iniciales son mínimos y reduce al máximo los errores cometidos por el operario, a la vez que no requiere mucha habilidad por parte del mismo.

Con la creación del prototipo de una máquina-herramienta CNC para el fresado y perforado automático de PCB, se brinda en la región acceso a este tipo de tecnología, estableciendo de esta manera alternativas para la producción en serie de placas de circuito impreso, de una calidad final muy alta a un costo de fabricación muy bajo.

La máquina es de gran ayuda para los estudiantes de ingeniería electrónica y todo tipo de personas que se dediquen al desarrollo de productos electrónicos, debido a que les permitirá llevar fácilmente sus circuitos desde la protoboard hasta la placa de impreso, en un tiempo de producción bastante corto. Por lo tanto desde el punto de vista funcional, económico, y académico práctico, se confirma como necesario la sistematización del proceso de fabricación de placas de circuito impreso.

Este informe se divide en los capítulos que se nombran a continuación para proporcionar una guía práctica en cuanto a su estudio:

El capítulo 1 (Identificación) describe cual es la necesidad existente, el por qué del presente trabajo y delimita los alcances de la máquina, además de plantear los objetivos tanto generales como específicos.

El capítulo 2 (Marco conceptual) se trata la teoría relativa al estudio, acompañada de definiciones, formulas, teoremas, etc.

El capítulo 3 (Programación de control numérico) trata sobre la programación en código G y sus diferentes instrucciones y usos.

El capítulo 4 (Desarrollo preliminar) aborda desde un punto de vista inicial, todas las etapas de diseño a implementar dentro del prototipo.

El capítulo 5 (Diseño prototipo máquina CNC) muestra específicamente las etapas de diseño, la selección de los diferentes componentes y la implementación.

El capítulo 6 (Especificaciones técnicas del sistema) muestra un resumen de las capacidades técnicas del prototipo

El capítulo 7 (Especificaciones técnicas) muestra en resumen las capacidades de trabajo del prototipo

El capítulo 8 (Conclusiones) se destacan la obtención de los objetivos planteados y la enumeración de distintos consejos para trabajos futuros.

El capítulo 9 (Recomendaciones) se enumeran algunas observaciones útiles para trabajos posteriores-

El presente informe se presenta a consideración del lector.

1. IDENTIFICACIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las PCB (*printed circuit board*) o placas de circuito impreso son una pieza fundamental en el montaje final de todo tipo de desarrollos electrónicos, puesto que permite darle firmeza al circuito y a la vez tener una presentación adecuada para el usuario final, lastimosamente los procesos de fabricación industriales de estas placas se realizan en máquinas-herramientas CNC complejas, a las cuales es muy difícil tener acceso.

Actualmente los costos de adquisición de una máquina CNC profesional para la producción en serie de placas de circuito impreso son demasiado altos, esto conlleva a que la elaboración de las PCB se realice de forma artesanal por parte de los estudiantes de ingeniería electrónica y los profesionales del rango en la región, recurriendo a métodos de xerografiado, algo costosos, y en el peor de los casos a dibujar manualmente el circuito sobre la placa virgen de baquelita. Por supuesto el resultado final de estos procesos deja mucho que desear, además que plantea la imposibilidad de generar circuitos en serie de una forma eficiente donde la relación costo-beneficio sea alta.

Todo esto conlleva a que los diseños desarrollados por los estudiantes y profesionales muchas veces no pasen más allá del montaje sobre la protoboard, dejando el circuito mucho tiempo ensamblado sobre la misma o simplemente desarmándolo perdiendo todo el trabajo que se había realizado.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Debido al limitado acceso a un método económico, de alta calidad y de producción en serie para la fabricación de placas de circuito impreso, ¿Cómo solventar la necesidad de diseñar e implementar placas de circuito impreso a un bajo costo con una excelente calidad, a través de la construcción de un equipo electro-mecánico?

1.3 ALCANCE Y DELIMITACION

Con este proyecto se pretende diseñar, construir y programar un prototipo de máquina fresadora y perforadora para la elaboración automática de placas de circuito impreso, utilizando para ello el control numérico por computador (CNC). La máquina es capaz de fresar placas de baquelita de una dimensión máxima de 15x25cm, para ello se utilizan motores paso a paso con una resolución de 200 pasos por vuelta en configuración de paso completo, con un torque máximo de 50mNm, un voltaje nominal de 7V y un consumo de corriente por fase de 0,7A. El

intercambio de herramientas en la máquina se realiza de forma manual, ya que por el reducido número de herramientas necesarias para el fresado y perforado de las PCB, no se hace necesario implementar un intercambiador automático. Los planos de las placas de circuito impreso se generan utilizando software especializado como Eagle o Ares.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Crear un prototipo de una máquina CNC para el fresado y perforado de placas de circuito impreso PCB.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar una máquina CNC, para el fresado y perforado de placas de circuito impreso PCB.
- Construir una máquina fresadora CNC a pequeña escala, con materiales de bajo costo y de fácil adquisición en la región.
- Realizar la programación de la máquina-herramienta CNC, para fresar y perforar PCB de forma automática.

1.6 LINEA DE INVESTIGACION

El proyecto está inscrito en la línea de investigación de Automatización y Control del Programa de Ingeniería Electrónica.

1.7 MODALIDAD

El proyecto está inscrito en la modalidad de trabajo de aplicación.

2 MARCO CONCEPTUAL Y CONCEPTOS BASICOS

2.1 APROXIMACION HISTORICA Y TENDENCIAS DEL CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO.

Desde sus inicios, la humanidad ha intentado darle alguna clase de automatización a las labores que realiza a diario, un claro ejemplo son los egipcios, quienes instalaron brazos mecánicos en las estatuas de sus dioses, que operados por sacerdotes, clamaban que los movimientos eran realizados por los dioses. Los griegos, por otro lado, construyeron estatuas que utilizaban los avances realizados en hidráulica para fascinar a los visitantes de los templos. En los siglos XVII y XVIII en Europa, utilizando complejos sistemas de muchas piezas, se construyeron pequeños muñecos mecánicos que tenían algunas características de los robots actuales. Así podemos seguir avanzando pasando por la imprenta, el telar, la máquina de vapor, hasta llegar a las modernas máquinas CNC actuales. A continuación se presenta una tabla donde nos muestra el desarrollo del control numérico.

Tabla 1. Evolución CNC.

1725	Aparecen en Inglaterra la primeras máquinas de coser controladas mediante tarjetas perforadas
1863	Henri Fourneaux inventa un piano que reproduce de forma automática, utilizando dispositivos neumáticos, las notas escritas en un rollo perforado.
1870-1890	Eli Whitney establece el concepto de crear herramientas para producir partes intercambiables, utilizando plantillas y troqueles.
1940	Se introduce el control de sistemas hidráulicos, neumáticos y electrónicos, aumentando de esta manera el énfasis en el maquinado automático.
1945	Se inicia la investigación y desarrollo del control numérico. Inician los experimentos de producción a gran escala utilizando control numérico.
1955	Aparecen en las plantas de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos las primeras herramientas automatizadas.
1956	Continúa con mayor auge la investigación y desarrollo del control numérico.
1960 - Actualidad	<p>Aparecen varios nuevos sistemas de control numérico.</p> <p>Se perfeccionan las aplicaciones a la producción de una gama más grande de procedimientos de maquinado de metales.</p> <p>Se idean aplicaciones a otras actividades diferentes al maquinado de metales.</p> <p>Se utilizan insumos computarizados de control numérico.</p> <p>Se utilizan documentos computarizados de planeación de gráficos por control numérico.</p>

	<p>Se han desarrollado procedimientos computarizados de trazo de curvas de nivel por control numérico a bajo costo.</p> <p>Se han establecido centros de maquinado para utilización general.</p>
--	--

Fuente: ARROYO TERAN, Gabriel. Generación de secuencias de maquinado usando VISI-Series para la fresadora DYNA EM-3116. Michoacán, México. 2006. P.25

En la actualidad, la industria del control numérico presenta varios desafíos a superar, todos tendientes a obtener una mayor calidad de piezas con costos y tiempos de mecanizado mucho menores, algunos de estos de estos desafíos son:

- Una mayor exigencia en la precisión de las piezas.
- La complejidad de los diseños ha aumentado considerablemente.
- La diversidad de productos hace necesario la tendencia a estructuras de producción más flexibles.
- Se tiende a incrementar los tiempos de inspección.
- Los costos de fabricación de moldes son mayores y se hace necesario minimizar errores.
- El tiempo de entrega de los productos es cada vez más reducido.
- La formación de instructores es cada vez más difícil, pues se hace necesario personal cada vez más experimentado.

2.2 AUTOMATIZACIÓN

El término automatización se refiere a una amplia variedad de sistemas y procesos que operan con una mínima, incluso sin intervención, del ser humano. Un sistema automatizado ajusta sus operaciones en respuesta a cambios en las condiciones externas en tres etapas: mediación, evaluación y control¹. Actualmente, en la industria existen 5 formas de automatizar un proceso de producción.

- Control Automático de Procesos: se refiere usualmente al manejo de procesos caracterizados por diversos tipos de cambios, generalmente químicos y físicos; un ejemplo de esto lo podría ser el proceso de refinación de petróleo.
- Proceso electrónico de datos: frecuentemente es relacionado con los sistemas de información, centros de cómputo, etc. Sin embargo en la actualidad también se considera dentro de esto la obtención, análisis y registros de datos a través de interfaces y computadores.
- Automatización fija: Se utiliza cuando el volumen de producción es muy alto, por tanto, se puede justificar económicamente el alto costo del diseño de equipo especializado para procesar el producto con rendimiento alto y tasas de producción elevadas. Un posible inconveniente de la automatización fija es su

¹ ¿Qué es la automatización? (2008). Obtenido el 23 de enero de 2012 de Quiminet, información y negocios segundo a segundo. <<http://www.quiminet.com/articulos/que-es-la-automatizacion-27058.htm>>

ciclo de vida que va de acuerdo a la vigencia del producto en el mercado. Actualmente estos sistemas se han ido flexibilizando al introducir algunos elementos de programación como PLC (Programmable Logic Controller).

- Control numérico computarizado: Se emplea cuando el volumen de producción es relativamente bajo y hay una diversidad de producción a obtener. En este caso el equipo de producción es diseñado para adaptarse a las variaciones de configuración del producto; esta adaptación se realiza por medio de un programa (Software). Este tipo de control es aplicado con éxito a Máquinas de Herramientas de Control Numérico (MHCN) como fresadoras, tornos, máquinas de electro-erosionado, etc.
- Automatización flexible: Se emplea para un rango de producción medio. Estos sistemas poseen características de la automatización fija y de la automatización programada. Los sistemas flexibles suelen estar constituidos por una serie de estaciones de trabajo interconectadas entre sí por sistemas de almacenamiento y manipulación de materiales, controlados en su conjunto por una computadora.

Para realizar la automatización del proceso de elaboración de placas de circuito impreso se usa el control numérico computarizado, ya que presenta una serie de características idóneas para su implementación, como su bajo costo de producción.

El CNC presenta innumerables ventajas respecto a los demás métodos de automatización siendo una de las principales, la reducción en los tiempos de producción, por una importante disminución en los tiempos muertos en el mecanizado, con lo cual se genera mayor fiabilidad en la producción de piezas y se reduce los tiempos de control de calidad. Por otro lado, al ser un proceso completamente automático y de fácil repetibilidad, reduce los tiempos de mano de obra y de inventarios a la vez que se disminuyen cuantiosamente los errores que puede cometer el operador. Sin embargo, el alto costo inicial de una fresadora CNC, hace que esta tecnología no esté al alcance de la mayoría de las personas.

2.3 CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO

El Control Numérico por Computador también llamado CNC (por sus siglas en inglés *Computer Numerical Control*) (también Control Numérico Continuo *Continuous Numerical Control*), se puede definir como un dispositivo de automatización de una máquina que mediante una serie de instrucciones codificadas controla su funcionamiento². Cada programa establece un determinado proceso a realizar por la máquina. Una misma máquina puede efectuar automáticamente procesos distintos sustituyendo solamente su programa de trabajo. Permite, por tanto, una elevada flexibilidad de funcionamiento con respecto a las máquinas convencionales en las que los automatismos se

² CUERVO, Benedicto. Energías Alternativas, automatización y robótica. México. 2006. 140p

conseguían mediante sistemas mecánicos o eléctricos complicados y algunas veces casi imposibles de modificar. Los elementos básicos del Control Numérico son:

- *El programa*, que contiene toda la información de las acciones a ejecutar.
- *El Control Numérico*, que interpreta estas instrucciones, las cuales convierte en las señales correspondientes para los órganos de accionamiento de la máquina y comprueba los resultados.
- *La máquina*, que ejecuta las operaciones previstas.

2.4 MÁQUINA POR CONTROL NUMÉRICO³

El CNC tuvo su origen a principios de los años cincuenta en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), en donde se automatizó por primera vez una gran fresadora. En esta época las computadoras estaban en sus inicios y eran tan grandes que el espacio ocupado por la computadora era mayor que el de la máquina.

Hoy día las computadoras son cada vez más pequeñas y económicas, con lo que el uso del CNC se ha extendido a todo tipo de maquinaria: tornos, rectificadoras, electro-erosionadoras, máquinas de coser, etc.

En una máquina CNC, a diferencia de una máquina convencional o manual, una computadora controla la posición y velocidad de los motores que accionan los ejes de la máquina. Gracias a esto, puede hacer movimientos que no se pueden lograr manualmente como círculos, líneas diagonales y perforaciones. Una vez programada la máquina, ésta ejecuta todas las operaciones por sí sola, sin necesidad de que el operador esté manejándola. Esto permite aprovechar mejor el tiempo del personal para que sea más productivo.

Entre las operaciones de maquinado que se pueden realizar en una máquina CNC se encuentran las de torneado y de fresado. Sobre la base de esta combinación es posible generar, siendo el propósito de este proyecto, las placas de circuito impreso. Para mecanizar una PCB, se usa un sistema de coordenadas que especifican el movimiento de la herramienta de fresado.

El sistema se basa en el control de los movimientos de la herramienta de trabajo con relación a los ejes de coordenadas de la máquina, usando un programa informático, ejecutado por un ordenador. En el caso de una fresadora, se realiza el control de los movimientos de la herramienta en los tres ejes de coordenadas cartesianas, el eje de las X para los desplazamientos laterales del carro, el eje de las Y para los desplazamientos transversales de la torre y el eje de las Z para los

³ ESCALONA, Iván. Introducción al control numérico computarizado (CNC). México. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería, Ciencias Sociales y Administrativas. 2011. 96p.

movimientos verticales. Para ello se incorporan servomotores en los mecanismos de desplazamiento del carro, la torre y el husillo.

2.5 COMPONENTES MAQUINA CNC ⁴

Al analizar una máquina con CNC, se observa que mantiene un principio de funcionamiento similar al de una máquina convencional, con excepción de la innovación que le confiere su ordenador o unidad de gobierno. Este componente es quien más ha evolucionado con el correr de muy poco tiempo, aunque los demás elementos que conforman tradicionalmente una máquina herramienta, han debido adecuarse a las altas velocidades de maquinado, y a la extrema precisión en los posicionamientos tanto de las herramientas como de las piezas.

Se puede decir, que los elementos componentes de una máquina con CNC, son:

- La unidad de gobierno.
- Los actuadores.
- Los transductores.
- Portaherramientas.
- Dispositivos para el cambio de herramientas.
- Husillo principal.
- Herramientas de fresado.
- Sistema de transmisión.

2.5.1 La unidad de gobierno: Es el elemento que contiene la información necesaria para todas las operaciones de desplazamientos de las herramientas, giro de los husillos, desplazamiento de los ejes, etc. Está conformada por el ordenador o procesador, que es donde se encuentra la memoria de almacenamiento de los datos de maquinado y el software de control numérico, que interpreta dicha información para luego ser transformada en impulsos eléctricos y transmitidos a los distintos motores de la máquina.

2.5.2 Los actuadores: Estos elementos se encargan principalmente de los movimientos de los carros o mesas de la máquina. Son actuadores del tipo motor paso a paso. Reciben los impulsos eléctricos del control, y le transmiten un determinado número de rotaciones o inclusive una fracción de rotación a los tornillos que trasladarán las mesas o los carros. Los actuadores con motores paso a paso, constan de un generador de impulsos que regulan la velocidad de giro del motor variando la cantidad y frecuencia de los impulsos emitidos. Estos motores giran un ángulo (paso) de aproximadamente 1° a 10° por impulso. La cantidad de impulsos puede variar hasta 16.000 por segundo, dando como resultado una gran gama de velocidades.

⁴ CORREA, Julio Alberto. Control Numérico Computarizado. Rosario (Argentina). Escuela Técnica Nuestra Señora del Rosario. 1997. P5.

2.5.3 Los transductores: La función de los mismos consiste en informar por medio de señales eléctricas la posición real de la herramienta al control, de manera que este pueda compararla con la posición programada de la misma, y efectuar los desplazamientos correspondientes para que la posición real sea igual a la teórica. Para la máquina diseñada, en donde se utilizan motores paso a paso, solo es necesario disponer de sensores finales de carrera, ya que con este tipo de motores, conociendo exactamente el número de pasos enviados, se conoce cuál es el desplazamiento realizado por el carro o mesa. Los finales de carrera son ubicados como precaución, para evitar que la máquina se desplace por accidente fuera de sus límites y se produzcan daños en la estructura mecánica.

2.5.4 Portaherramientas: El portaherramientas es el dispositivo de sujeción de la herramienta de fresado en una máquina herramienta. Hay muchas herramientas de corte diferentes en cuanto a forma y tamaño. El tipo de portaherramientas debe ser elegido en función de la máquina y de la herramienta a utilizar. En las máquinas modernas de control numérico por computadora (CNC), la elección de un portaherramientas adecuado es importante para asegurar un mecanizado preciso con productividad. Otra forma de definir este importante parte de una máquina CNC es: Artefacto intercambiable que actúa como conexión entre el husillo de la máquina herramienta y la herramienta de corte de tal forma que la eficiencia del elemento no disminuye⁵. Según esta segunda definición los portaherramientas se pueden clasificar según cuatro parámetros fundamentales.

- **Concentricidad:** La rotación axial del husillo de la máquina y la herramienta de corte deben mantener una concentricidad.
- **Fuerza de Sujeción:** La herramienta de corte debe estar bien sujeta para soportar la rotación dentro del portaherramientas.
- **Calibrado:** El portaherramientas debe estar regulado. La aplicación de calibrado apropiada asegura una perfecta regulación de la sujeción del portaherramientas.
- **Equilibrado:** El porta machos y el husillo de la máquina deben estar perfectamente equilibrados con la máxima precisión posible.

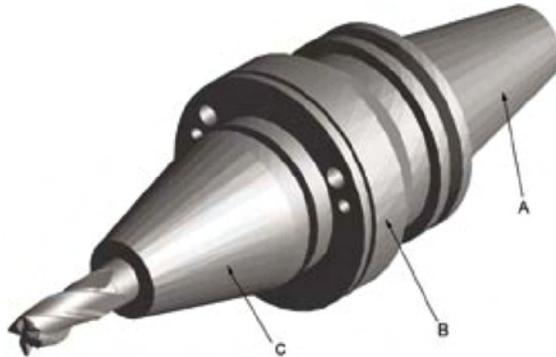
Las principales cualidades necesarias en un portaherramientas son:

- Ser suficientemente rígido para soportar las fuerzas de corte sin sufrir vibraciones durante el mecanizado y ofrecer estabilidad y repetibilidad al proceso.
- Tener precisión en la ubicación de la punta de la herramienta, especialmente, en herramientas rotativas, donde deben evitarse desviaciones en la coaxialidad de la herramienta, así como un insuficiente equilibrado que daría lugar a fuerzas centrífugas excesivas.

⁵ Portaherramientas, consejos generales de los portaherramientas. Dormer. Obtenido el 14 de febrero de 2012 de
<[http://www.dormertools.com/sandvik/2531/Dutch/s004444.nsf/Alldocs/Product*2DMachiningSolutions*2DPDF*2ATH*2DPDFes/\\$file/10Portaherramientas.pdf](http://www.dormertools.com/sandvik/2531/Dutch/s004444.nsf/Alldocs/Product*2DMachiningSolutions*2DPDF*2ATH*2DPDFes/$file/10Portaherramientas.pdf) >

- Poder transmitir los esfuerzos de corte entre el soporte y la herramienta sin desplazamientos indeseados de la herramienta.
- Tener buena accesibilidad, versatilidad operativa y mantenimiento sencillo, para reducir los tiempos de cambio de herramienta y mantenimiento, como paradas de medición.

Figura 1. Porta-herramientas.



FUENTE: Portaherramientas, consejos generales de los portaherramientas. Dormer. Obtenido el 14 de febrero de 2012 de <[http://www.dormertools.com/sandvik/2531/Dutch/s004444.nsf/Alldocs/Product*2D MachiningSolutions*2DPDF*2ATH*2DPDFes/\\$file/10Portaherramientas.pdf](http://www.dormertools.com/sandvik/2531/Dutch/s004444.nsf/Alldocs/Product*2D MachiningSolutions*2DPDF*2ATH*2DPDFes/$file/10Portaherramientas.pdf)>

Según la figura anterior un portaherramientas se puede separar en tres partes:

- Cono (A), es la conexión con el husillo de la máquina.
- Sistema para el equilibrio (B).
- Mecanismo de sujeción, porción que sujeta la herramienta(C).

2.5.5 El husillo principal: El husillo principal ejecuta la rotación de herramienta de fresado en la máquina CNC. Para el desarrollo del proyecto se busca un husillo que tenga una alta velocidad de rotación, sin embargo no es necesario que su torque sea muy alto, ya que la fricción con la baquelita es muy pequeña.

El husillo puede accionarse por:

- Motores de corriente alterna de tres fases.
- Motores de corriente continua.

En la mayor parte de las máquinas CNC el elemento que acciona el cabezal es un motor de corriente continua. Esto proporciona una variedad casi infinita de velocidades de giro, las cuales se procesan mediante un tacómetro. Todo ello permite al programador establecer la velocidad de giro de forma casi arbitraria, dentro del rango y capacidad del motor. Dentro de los alcances del proyecto, no está definida la regulación de la velocidad del motor, puesto que al ser un único material el que se va a mecanizar, capa de cobre sobre un sustrato de baquelita,

no es necesario un control muy exigente de la velocidad del motor, sin embargo, este control es necesario cuando los tipos de materiales a trabajar son diversos.

2.5.6 Herramientas de fresado: Una herramienta completa de fresado CNC presenta tres partes fundamentales, el acoplamiento, el portaherramientas o portaplaquita y la punta de la herramienta o plaquita.⁶

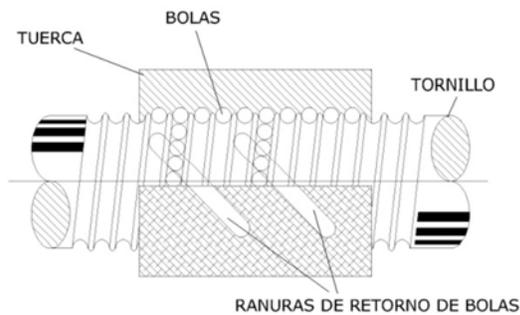
El acoplamiento es el elemento que inserta la herramienta en el seno del cabezal de la fresadora. La morfología de los mangos y de las plaquitas es la responsable de las posibilidades de mecanizado y de los acabados a obtener en las piezas de trabajo. Las puntas de las herramientas pueden estar unidas al mango permanentemente (soldadas). Sin embargo es más habitual el uso de sistemas de plaquitas intercambiables que se fijan mediante tornillos, palancas, bridas, etc. Las plaquitas al disponer de varios filos pueden alternar, invertir o cambiar definitivamente cuando sufren cualquier deterioro.

2.5.7 Sistema de transmisión: Los recorridos de la herramienta en el seno de la pieza se originan por la acción combinada de los desplazamientos en cada uno de sus ejes principales. Los sistemas de transmisión producen traslaciones rectilíneas en los ejes principales a partir del giro básico generado por el grupo del motor-reductor.

El corazón del movimiento de las máquinas-herramienta es la transmisión por recirculación de bolas. Consiste en un sinfín acanalado y un acoplamiento al que se fija el conjunto mecánico a desplazar. Cuando el grupo del motor gira, su rotación se transmite al sinfín y el cuerpo del acoplamiento se traslada longitudinalmente a través de este arrastrando consigo a la mesa de trabajo en el sentido oportuno. El accionamiento contiene un conjunto de bolas en recirculación que garantizan la transmisión de esfuerzos del sinfín a la mesa con unas pérdidas por fricción mínimas. Las dos partes de su cuerpo están ajustadas con una precarga para reducir al mínimo el juego transversal entre ellas con lo que se mejora la exactitud y repetibilidad de los desplazamientos. Para disminuir los daños del mecanismo de transmisión frente a colisiones transversales o sobrecargas, el grupo motriz incorpora un embrague en su conexión con el sinfín. Este dispositivo desacopla la transmisión cuando el conjunto de la mesa choca contra algún obstáculo.

Figura 2. Tornillo sin fin con tuerca con bolas recirculantes

⁶ *APUNTES DE INGENIERIA MECANICA*. Portal para investigadores y profesionales. Colombia. Obtenido el 8 de febrero de 2012 de <http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_mecanica/controlnumericocnc/default.asp>



FUENTE: Esta investigación

2.6 ACTUADORES

Los actuadores tienen por misión generar el movimiento de los elementos de la fresadora según las órdenes dadas por la unidad de control. Los actuadores utilizados pueden emplear energía neumática, hidráulica o eléctrica. Cada uno de estos sistemas presenta características diferentes, siendo preciso evaluarlas a la hora de seleccionar el tipo de actuador más conveniente. Algunas de las características a tener en cuenta son: potencia, controlabilidad, peso y volumen, precisión, velocidad, mantenimiento y costo.

Existen varios tipos de motores y continuará proliferando nuevos tipos de motores según avance la tecnología. Pero antes de adentrarnos en la clasificación, vamos a definir los elementos que componen a los motores.

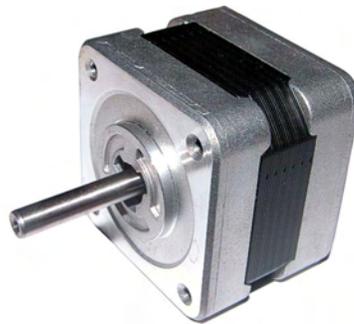
- La carcasa o caja que envuelve las partes eléctricas del motor, es la parte externa.
- El inductor, llamado estator cuando se trata de motores de corriente alterna, consta de un apilado de chapas magnéticas y sobre ellas está enrollado el bobinado estatórico, que es una parte fija y unida a la carcasa.
- El inducido, llamado rotor cuando se trata de motores de corriente alterna, consta de un apilado de chapas magnéticas y sobre ellas está enrollado el bobinado rotórico, que constituye la parte móvil del motor y resulta ser la salida o eje del motor.

Los tipos existentes de motores de corriente son los motores de corriente continua, motores de corriente alterna, servomotores y motores paso a paso. Para el desarrollo de la máquina CNC se decide utilizar motores paso a paso, ya que presentan un sistema de fácil posicionamiento, aunque su torque es reducido, razón por la cual a la salida de los motores se utilizan moto-reductores con el fin de aumentar su potencia mecánica, a la vez que aumenta la exactitud de posicionado de la máquina

2.7 MOTOR PASO A PASO (STEPPER MOTORS)

Los motores paso a paso son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos. La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde 90° hasta pequeños movimientos de tan solo 1.8° , es decir, que se necesitarán 4 pasos en el primer caso (90°) y 200 para el segundo caso (1.8°), para completar un giro completo de 360° ⁷.

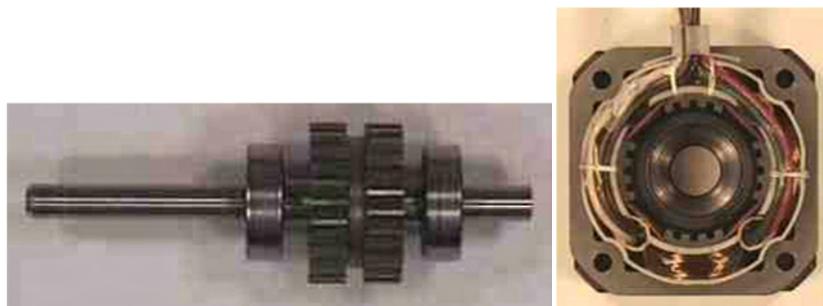
Figura 3. Motor paso a paso



FUENTE: Súper robótica. Robótica fácil. Obtenido el 12 de febrero. <<http://www.superrobotica.com/S330300.htm>>

Estos motores tienen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición o bien totalmente libres. Si una o más de sus bobinas están energizadas, el motor estará enclavado en la posición correspondiente y por el contrario quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas. Los motores paso a paso, están compuestos por dos partes, una fija, llamada estator y una móvil llamada rotor. El estator se encuentra en la periferia del motor y es el encargado de generar el flujo principal; mientras que el rotor se encuentra en el centro del motor, unido al eje, y su función es reaccionar a la excitación del estator produciendo el movimiento de rotación o una fuerza de enclavamiento.

Figura 4. Rotor y estator en un motor paso a paso



⁷ TUTORIAL SOBRE MOTORES PASO A PASO. TodoRobot. Obtenido el 14 de febrero de 2012 de <<http://www.todorobot.com.ar/informacion/tutorial%20stepper/stepper-tutorial.htm>>

FUENTE: Motores paso a paso. Centro de Formación del Profesorado e Innovación Educativa de Valladolid.
 <http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/sistema/motores_p-p.htm>

2.8 PARÁMETROS DE LOS MOTORES PASO A PASO

Desde el punto de vista mecánico y eléctrico, las principales características y parámetros que se definen sobre un motor paso a paso son:

- Par dinámico de trabajo (*Working Torque*): Depende de sus características dinámicas y es el momento máximo que el motor es capaz de desarrollar sin perder paso, es decir, sin dejar de responder a algún impulso de excitación del estator y dependiendo, evidentemente, de la carga. Generalmente se ofrecen, por parte del fabricante, curvas denominadas de arranque sin error (pull-in) y que relaciona el par en función el número de pasos. Hay que tener en cuenta que, cuando la velocidad de giro del motor aumenta, se produce un aumento de la f.c.e.m. en él generada y, por tanto, una disminución de la corriente absorbida por los bobinados del estator, como consecuencia de todo ello, disminuye el par motor.
- Par de mantenimiento (*Holding Torque*): Es el par requerido para desviar, en régimen de excitación, un paso el rotor cuando la posición anterior es estable; es mayor que el par dinámico y actúa como freno para mantener el rotor en una posición estable.
- Par de detención (*Detention Torque*): Es una par de freno que siendo propio de los motores de imán permanente, es debida a la acción del rotor cuando los devanados del estator están desactivados.
- Angulo de paso (*Step angle*): Se define como el avance angular que se produce en el motor por cada impulso de excitación. Se mide en grados, siendo los pasos estándar más importantes los siguientes:

Tabla 2. Valores típicos de números de pasos por vuelta en motores PaP.

Grados por impulso de excitación	Nº de pasos por vuelta
0,72°	500
1,8°	200
3,75°	96
7,5°	48
15°	24

FUENTE: Esta investigación

- Número de pasos por vuelta: Es la cantidad de pasos que ha de efectuar el rotor para realizar una revolución completa; para calcular el número de pasos por vuelta se tiene:

Donde

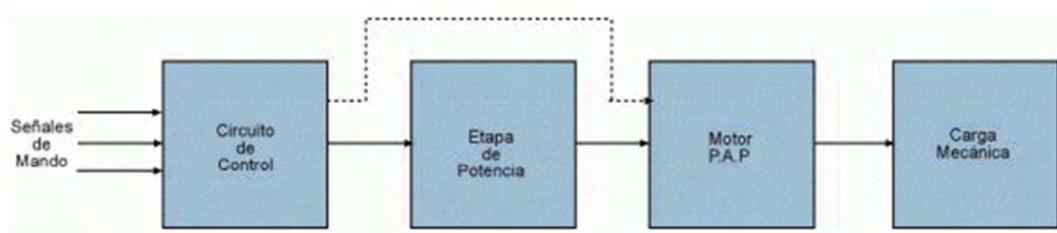
- NP = número de pasos por vuelta
- α = ángulo de paso
- Frecuencia de paso máximo (*Maximum pull-in/out*): Se define como el máximo número de pasos por segundo que puede recibir el motor funcionando adecuadamente.
- Momento de inercia del rotor: Es su momento de inercia asociado, que se expresa en gramos por centímetro cuadrado.
- Par de mantenimiento, de detención y dinámico: Definidos anteriormente y expresados en mili Newton por metro.

2.9 CONTROL DE LOS MOTORES PASO A PASO

Para realizar el control de los motores paso a paso, es necesario generar una secuencia determinada de impulsos. Además es necesario que estos impulsos sean capaces de entregar la corriente necesaria para que las bobinas del motor se exciten.

El diagrama de bloques de un sistema con motores paso a paso es el que se muestra en la Figura 5.

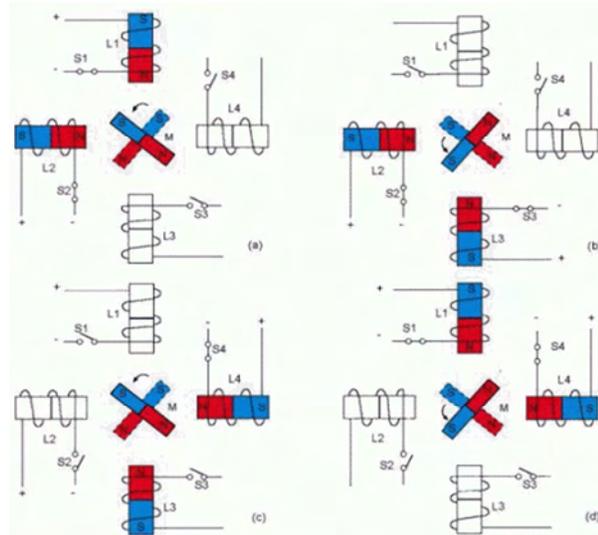
Figura 5. Diagrama de bloques de un sistema con motores PaP



Fuente: VALENZUELA, Rubén. 2006

El principio de funcionamiento básico de los motores paso a paso consiste en alimentar solo algunas de las bobinas del estator con corriente continua generando un flujo con una dirección fija, que al interactuar con el rotor del motor produce un par en función de el ángulo de desfase de la posición de equilibrio, que depende del tipo de motor paso a paso empleado. Para producir el movimiento de rotación la bobina excitada debe cambiar a medida que el rotor llega a la posición de equilibrio.

Figura 6. Principio de funcionamiento de un motor paso a paso.

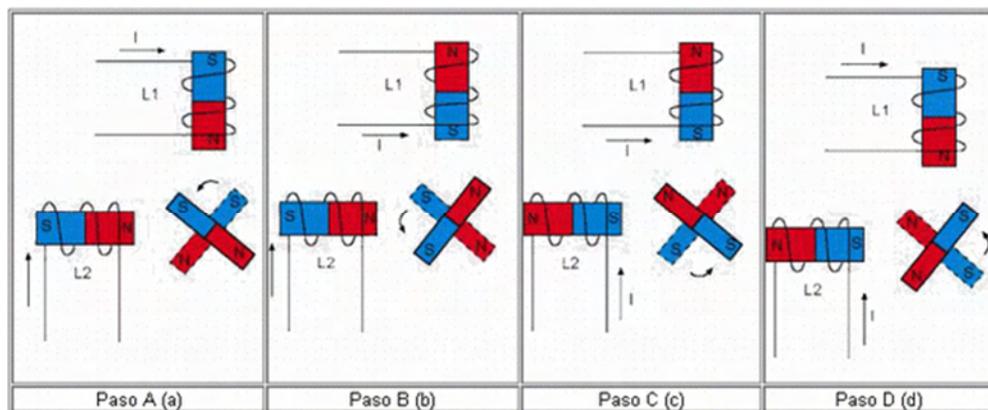


Fuente: CUENCA, Fernando. Máquinas eléctricas y sistemas electromecánicos. San Carlos de Bariloche. Universidad Nacional de Cuyo. 2007. P. 3

2.10 MOTOR PASO A PASO DE IMÁN PERMANENTE.

Este tipo de motores tienen un núcleo compuesto por un imán permanente de perfil redondeado. Cuando se excita el estator, las bobinas se comportan como electroimanes y entonces el imán del rotor busca alinearse con campo generado. En la Figura 7 se muestra en forma esquemática el principio de funcionamiento, en el esquema se ve en forma clara como se puede fijar la posición del rotor con la forma de alimentación de las bobinas.

Figura 7. Principio de funcionamiento de motor PaP de imán permanente.

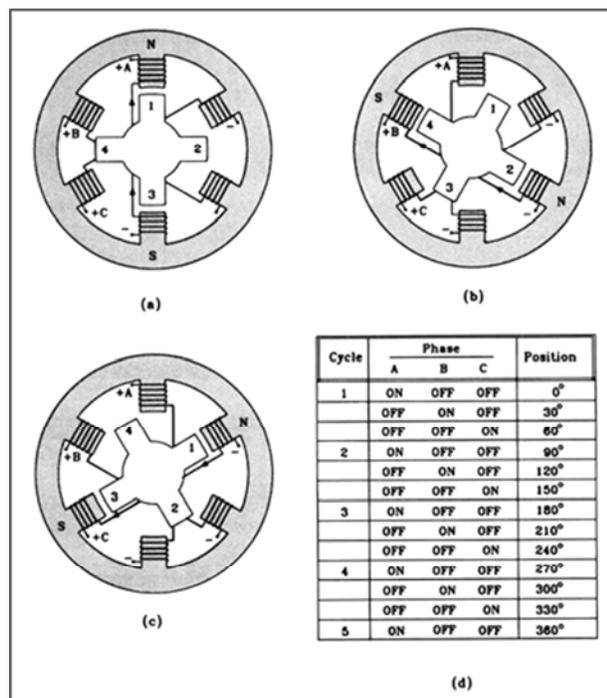


Fuente: CUENCA, Fernando. Máquinas eléctricas y sistemas electromecánicos. San Carlos de Bariloche. Universidad Nacional de Cuyo. 2007. P. 3

2.11 MOTOR PASO A PASO DE RELUCTANCIA VARIABLE.

El rotor es de acero dulce, cilíndrico y perfil dentado, cuando se excita el estator el flujo generado circula por el rotor, y éste intentará buscar la posición de menor reluctancia. En la Figura 8 se esquematiza el funcionamiento de los motores paso a paso de reluctancia variable. En la figura, el rotor se muestra con menos dientes que el estator, esto asegura que sólo un juego de dientes entre estator y rotor se alineará en un momento dado. El estator posee seis dientes y el rotor tiene cuatro dientes. En la Figura 8(a) se muestra la posición del rotor cuando la fase A se activa. Mientras la fase A se activa, el rotor se mantiene estacionario. Cuando la fase A se apaga y la fase B está activada, el rotor girará 30° hasta que los dos polos del rotor estén alineados con los polos norte y sur, establecidos por la fase B. El efecto de apagar la fase B y la dinamización de la fase C se muestra en la figura 8(c). En este momento, el rotor se mueve de nuevo 30° y ahora está alineado con los polos norte y sur, creados por la fase C. Después que el rotor ha sido desplazado 60° de su punto de partida, la secuencia de pasos ha completado un ciclo. La Figura 8(d) muestra la secuencia de conmutación para completar 360° de rotación en un motor de reluctancia variable, con seis polos del estator y cuatro polos del rotor. Al repetir este patrón, el motor va a girar en sentido horario. La dirección del motor se cambia invirtiendo el patrón de encendido y apagado de cada fase.

Figura 8. Esquema funcionamiento motor PaP de reluctancia variable

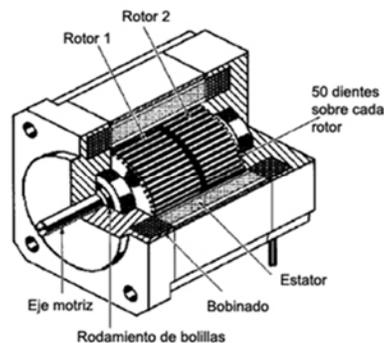


Fuente: CUENCA, Fernando. Máquinas eléctricas y sistemas electromecánicos. San Carlos de Bariloche. Universidad Nacional de Cuyo. 2007. P. 3

2.12 MOTOR PASO A PASO HIBRIDO

El motor Híbrido consiste en un estator dentado y un rotor de tres partes. El rotor de apilado simple contiene dos piezas de polos separados por un magneto permanente magnetizado, con los dientes opuestos desplazados en una mitad de un salto de diente (figura 9) para permitir una alta resolución de pasos .

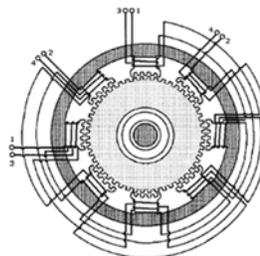
Figura 9. Vista isométrica motor híbrido por pasos.



Fuente: CUENCA, Fernando. Máquinas eléctricas y sistemas electromecánicos. San Carlos de Bariloche. Universidad Nacional de Cuyo. 2007. P. 4

Los motores por pasos híbridos tienen dos bobinados en cada polo estator, de manera que cada polo puede volverse norte o sur magnético, dependiendo del sentido de circulación de la corriente⁸. Una vista de sección de un motor por pasos híbrido ilustrando los polos múltiples con bobinados duales por polo y el rotor de dientes múltiples es ilustrado en la figura 10. El eje es representado por el círculo central en el diagrama.

Figura 10. Sección transversal de un motor por pasos híbrido mostrando los segmentos del núcleo rotor magnético y los polos estatores con su diagrama eléctrico.



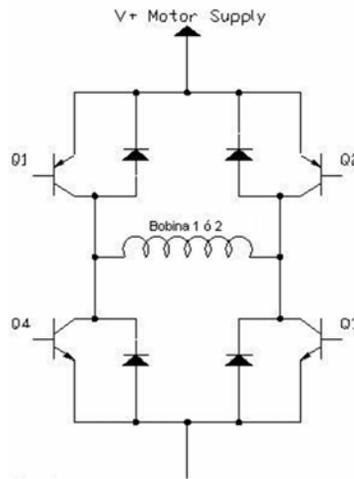
Los motores híbridos por pasos más populares tienen cableados de 3 y 5 fases y ángulos de paso de $1,8^\circ$ y $3,6^\circ$ por paso. Estos motores por pasos pueden proporcionar más torque para un armazón dado, que otros tipos de motores por pasos debido a que todos o todos menos uno de los bobinados del motor son energizados en cada punto en el ciclo de impulsión. Algunos motores de 5 fases tienen elevadas resoluciones de $0,72^\circ$ por paso (500 pasos por revolución). Con un controlador compatible, la mayoría de los motores híbridos pueden ser activados en medio paso o micro pasos.

2.13 ALIMENTACIÓN

Para conseguir el giro del rotor en un determinado número de grados, las bobinas del estator deben ser excitadas secuencialmente a una frecuencia que determina la velocidad de giro. Las inercias propias del arranque y parada (aumentadas por las fuerzas magnéticas en equilibrio que se dan cuando está parado) impiden que el rotor alcance la velocidad nominal instantáneamente, y por tanto la frecuencia de los pulsos que la fija debe ser aumentada progresivamente. Para simplificar el control de estos motores existen circuitos especializados que a partir de tres señales (tren de pulsos, sentido de giro e inhibición) generan, a través de una etapa lógica, las secuencias de pulsos que un circuito de conmutación distribuye a cada fase. Las bobinas del estator presenta dos tipos de conexión, bipolar y unipolar respectivamente:

En la conexión bipolar las bobinas opuestas se conectan en serie. Estos motores generalmente tienen cuatro cables de salida. Para lograr las distintas polaridades de campo es necesario invertir los dos terminales de cada bobina. Esto puede efectuarse utilizando un doble puente H (análogo al usado para alimentar motores de corriente continua). Esta conexión permite el manejo del rotor tanto por pasos completos como medio paso. Como se aprecia, es necesario un puente H por cada bobina del motor, es decir que para controlar un motor Paso a Paso de 4 cables (dos bobinas), necesitaremos usar dos H-Bridges iguales al de la figura 11. El circuito de la figura 11 es a modo ilustrativo y no corresponde con exactitud a un H-Bridge. En general es recomendable el uso de puentes H integrados como son los casos del L293.

Figura 11. Puente H



FUENTE: Esta investigación

En la conexión unipolar puede manejarse cada una de las bobinas individualmente dado que se tiene acceso al punto de unión de las bobinas opuestas. Estos motores suelen tener 6 o 5 cables de salida, dependiendo de su conexionado interno. Este tipo de motores se caracteriza por ser más simple de controlar. La energización también puede operar pasos completos o medios pasos. Hay aplicaciones en las cuales se requieren ángulos de paso muy pequeños. Usualmente no se trabaja con estatores de más de cuatro fases y con rotores de más de 100 dientes, por lo cual, para reducir el ángulo de paso se utiliza la técnica de microstepping o micropasos que consiste en dividir cada paso físico en subpasos de igual tamaño. Esto se efectúa utilizando distintos niveles de corrientes en las bobinas, de manera que el rotor se desplace a posiciones intermedias dentro de cada paso normal. Así es posible dividir un paso de 1.8° en diez subpasos iguales. Este tipo de tecnología es de gran auge en automatización para el control de motores paso a paso, pero su implementación está fuera de los alcances de este trabajo.

2.13.1 Secuencias para manejar motores paso a paso bipolares. Como se dijo anteriormente, estos motores necesitan la inversión de la corriente que circula en sus bobinas en una secuencia determinada. Cada inversión de la polaridad provoca el movimiento del eje en un paso, cuyo sentido de giro está determinado por la secuencia seguida.

A continuación se puede ver la tabla con la secuencia necesaria para controlar motores paso a paso del tipo Bipolares:

Tabla 3. Secuencia de control en motores paso a paso bipolares.

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

FUENTE: Esta investigación

2.13.2 Secuencias para manejar motores paso a paso unipolares. Existen tres secuencias posibles para este tipo de motores, las cuales se detallan a continuación. Todas las secuencias comienzan nuevamente por el paso 1 una vez alcanzado el paso final (4 u 8). Para revertir el sentido de giro, simplemente se deben ejecutar las secuencias en modo inverso.

La primera de las secuencias es llamada normal. Esta es la secuencia más usada y la que generalmente recomienda el fabricante. Con esta secuencia el motor avanza un paso por vez y debido a que siempre hay al menos dos bobinas activadas, se obtiene un alto torque de paso y de retención.

Tabla 4. Secuencia de control de motor paso a paso en modo normal.

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	
1	ON	ON	OFF	OFF	
2	OFF	ON	ON	OFF	
3	OFF	OFF	ON	ON	

4	ON	OFF	OFF	ON	
---	----	-----	-----	----	--

Fuente: VALENCIA, Alejandro. Base investigativa en robótica aplicada. Medellín. Universidad de Medellín. 2005. P. 63

La segunda de las secuencias es llamada wave drive. En esta secuencia se activa solo una bobina a la vez. En algunos motores esto brinda un funcionamiento más suave. La contrapartida es que al estar solo una bobina activada, el torque de paso y retención es menor.

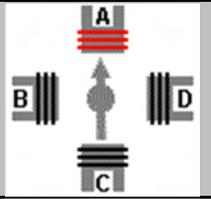
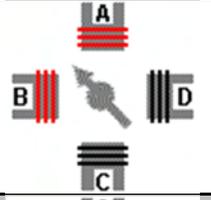
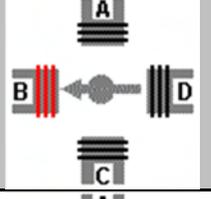
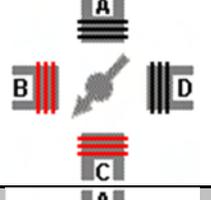
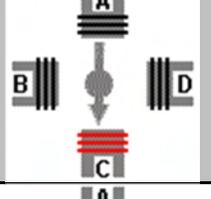
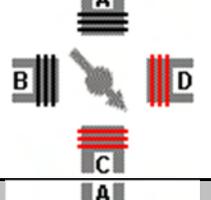
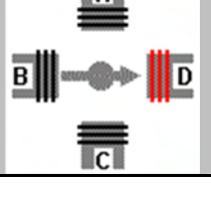
Tabla 5. Secuencia de control de motor paso a paso en modo wave drive.

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	OFF	ON	OFF	OFF	
3	OFF	OFF	ON	OFF	
4	OFF	OFF	OFF	ON	

Fuente: VALENCIA, Alejandro. Base investigativa en robótica aplicada. Medellín. Universidad de Medellín. 2005. P. 63

La tercera de las secuencias se denomina medio paso. En esta secuencia se activan las bobinas de tal forma de brindar un movimiento igual a la mitad del paso real. Para ello se activan primero 2 bobinas y luego solo 1 y así sucesivamente. Como vemos en la tabla la secuencia completa consta de 8 movimientos en lugar de 4.

Tabla 6. Secuencia de control de motor paso a paso en modo medio paso.

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	ON	ON	OFF	OFF	
3	OFF	ON	OFF	OFF	
4	OFF	ON	ON	OFF	
5	OFF	OFF	ON	OFF	
6	OFF	OFF	ON	ON	
7	OFF	OFF	OFF	ON	

8	ON	OFF	OFF	ON	
---	----	-----	-----	----	--

Fuente: VALENCIA, Alejandro. Base investigativa en robótica aplicada. Medellín. Universidad de Medellín. 2005. P. 64

Cabe destacar que debido a que los motores paso a paso son dispositivos mecánicos y como tal deben vencer ciertas inercias, el tiempo de duración y la frecuencia de los pulsos aplicados es un punto muy importante a tener en cuenta. En tal sentido el motor debe alcanzar el paso antes que la próxima secuencia de pulsos comience. Si la frecuencia de pulsos es muy elevada, el motor puede reaccionar en alguna de las siguientes formas:

- Puede que no realice ningún movimiento en absoluto.
- Puede comenzar a vibrar pero sin llegar a girar.
- Puede girar erráticamente.
- Puede llegar a girar en sentido opuesto.

Para obtener un arranque suave y preciso, es recomendable comenzar con una frecuencia de pulso baja y gradualmente ir aumentándola hasta la velocidad deseada sin superar la máxima tolerada. El giro en reversa debería también ser realizado previamente bajando la velocidad de giro y luego cambiar el sentido de rotación.

3 PROGRAMACION DE CONTROL NUMERICO

La programación es la base del control numérico, conocer dicha programación es absolutamente imprescindible para cualquier operario que intervenga en el proceso de fabricación de placas de circuito impreso, desde la oficina técnica hasta la mecanización.

En la actualidad existen programas CAM (Mecanizado Asistido por Ordenador), muy versátiles, potentes y rápidos en su ejecución, pero a pesar de ello realizar una pequeña modificación a pie de máquina es mucho más rápido que realizar el proceso desde el ordenador, naturalmente cualquier operario que no conozca el lenguaje de programación de su máquina, no podrá realizar dicha tarea.

3.1 ESTRUCTURA DE LA PROGRAMACION.

Un programa es una sucesión de órdenes y procesos correlativos que se realizan en un orden lógico y establecido por el programador y no en otro, de acuerdo a las condiciones del sistema. En sistemas de programación informáticos es absolutamente imprescindible escribir todo en el orden adecuado e introduciendo todas las órdenes sin omitir o intercambiar alguna, ya que las consecuencias pueden ser imprevistas.

Todos los programas inician con un nombre o un número identificador. Algunos controles numéricos solo aceptan números. Los programas CNC están compuestos por bloques sucesivos, cada uno de éstos es una instrucción para el control. Los bloques pueden estar numerados ó no, de no estarlo, el control los ejecutará en el orden en que los vaya encontrando. La numeración de los bloques puede no ser de uno en uno. Puede ser de cinco en cinco, de diez en diez, etc. Esto es conveniente para introducir luego bloques intermedios sin alterar toda la numeración. La numeración debe ser siempre creciente. Si existiera un bloque cuyo número sea menor al anterior, el control detiene la ejecución del programa.

Figura 12. Estructura de un bloque de programación



Fuente: LARREA ARIAS, Manuel Enrique. Diseño y manufactura asistida por computador (CAD-CAM) en la construcción de pieza con proceso de torneado de control numérico (CNC). Guayaquil, Ecuador. 2010. P. 27. Trabajo de grado (Tecnólogo en Mecánica Industrial). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Instituto de Tecnologías. Tecnología en Mecánica Industrial.

En cualquier programa CNC, se distinguen siempre dos grandes grupos de información:

- **Datos geométricos**
 - Datos dimensionales del contorno final.
 - Descripción de los movimientos de la herramienta.
 - Posicionamiento en el área de trabajo del cero y puntos de referencia necesarios.
- **Datos tecnológicos**
 - Datos de la herramienta.
 - Condiciones de corte (velocidad, avance, etc.)
 - Funciones auxiliares de máquina (refrigeración, giros, etc.)

La programación según el tipo de estructura puede dividirse en:

- Programación estructural
- Programación abierta

3.1.1 Programación estructural: Es el tipo de programación que se utiliza siguiendo una tabla o estructura de forma más o menos cerrada. Este sistema de programación se utiliza poco, pero algunos de los fabricantes de controles más importantes han optado por ese sistema.

Tabla 7. Ejemplo de programación estructural.

N	G	X	Y	Z	M
001	00	200	120		
002	01	210	140		03
003	90				
004	01	210	140	-12	05

FUENTE: Esta investigación

Se puede observar en la tabla, como las líneas están perfectamente estructuradas y aunque falte algún dato en alguna de las líneas, la casilla o espacio correspondiente se tiene que respetar.

3.1.2 Programación abierta: Es el más utilizado por los fabricantes de controles y el aplicado en la programación del prototipo de la máquina. Este tipo de programación es un sistema abierto, es decir, se pueden escribir líneas con dos caracteres o líneas con hasta 250 caracteres, pero con unas normas imprescindibles a respetar y en el orden de escritura predeterminado.

En la siguiente tabla se puede ver un ejemplo de programación abierta.

Tabla 8. Ejemplo de programación abierta.

N100 690 601 X20 Y16 230 F120 31200 TZ2 M12
N110 X22 M03
N120 Y5 M5
N120 Y5 M5

FUENTE: Esta investigación

Si se observa la tabla se puede detectar la diferencia que existen entre el tamaño de las diferentes líneas e incluso en la estructura de las mismas.

3.2 CODIGOS DE CONTROL NUMERICO PARA LA FRESADORA:

3.2.1 Lista de códigos G

Tabla 9. Lista de códigos G.

CODIGO G	GRUPO	FUNCION
G00	1	Avance rápido
G01	1	Interpolación lineal (avance de maquinado)
G02	1	Interpolación circular horaria
G03	1	Interpolación circular anti-horaria
G04	0	Espera para la puerta de la fresadora
G09	0	Parada exacta
G10	0	Colocar el cero del programa
G11	0	Cancelar modo cero del programa
G17	2	Seleccionar plano XY
G18	2	Seleccionar plano ZX
G19	2	Seleccionar plano YZ
G20	6	Entrada de datos en pulgadas
G21	6	Entrada de datos en milímetros
G22	9	
G23	9	
G27	0	Chequear el cero de máquina a la posición de referencia (home)
G28	0	Ir a la posición de referencia de la máquina (home)
G29	0	Regresar al punto de referencia
G30	0	Regresar al segundo punto de referencia
G31	0	Saltar una función
G33	1	Corte para rosca
G39	0	Interpolación circular en esquinas
G40	7	Cancelar compensación en el corte
G41	7	Compensación en el corte a la izquierda
G42	7	Compensación en el corte a la derecha
G43	8	Compensación en la longitud de la herramienta
G44	8	Compensación en la longitud de la herramienta
G49	8	Cancelar compensación en la longitud de la herramienta
G50	11	Cancelar la escala
G51	11	Escala
G54	14	Selección del sistema 1 de coordenadas de trabajo
G55	14	Selección del sistema 2 de coordenadas de trabajo
G56	14	Selección del sistema 3 de coordenadas de trabajo
G57	14	Selección del sistema 4 de coordenadas de trabajo

G58	14	Selección del sistema 5 de coordenadas de trabajo
G59	14	Selección del sistema 6 de coordenadas de trabajo
G60	0	Posición en una sola dirección
G61	15	Parar modo exacto
G62	15	Sistema de control en el modo automático en las esquinas
G63	15	Modo de roscado
G64	15	Modo de corte
G65	0	Llamado de marcos
G66	12	Esperar señal
G67	0	Esperar cancelación de la señal
G68	16	Coordinar rotación
G69	16	Cancelar coordinar rotación
G73	9	Avance rápido en el ciclo de perforado
G74	9	Ciclo de perforado con velocidades de corte
G76	0	Roscado
G80	9	Cancela el ciclo
G81	9	Ciclo de perforado sencillo
G82	9	Taladrado con tiempo de espera en el fondo
G83	9	Profundidad del agujero en el ciclo de perforado
G84	9	Ciclo de roscado
G85	9	Ciclo para ampliar agujeros
G86	9	Ciclo para ampliar agujeros
G87	9	Regresar al ciclo de ampliar agujeros
G88	9	Ciclo para ampliar agujeros
G89	9	Ciclo para ampliar agujeros
G90	3	Coordenadas absolutas
G91	3	Coordenadas incrementales
G92	0	Desplazamiento hasta el origen del sistema
G94	5	Velocidad de avance en mm/min
G95	5	Velocidad de avance en rev/min
G98	10	Regresar al nivel inicial
G99	10	Regresar al punto R

Fuente: LARREA ARIAS, Manuel Enrique. Diseño y manufactura asistida por computador (CAD-CAM) en la construcción de pieza con proceso de torneado de control numérico (CNC). Guayaquil, Ecuador. 2010. P. 27. Trabajo de grado (Tecnólogo en Mecánica Industrial). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Instituto de Tecnologías. Tecnología en Mecánica Industrial.

3.2.2 Lista de códigos M

Tabla 10. Lista de funciones M.

CODIGOS M	FUNCION
M00	Para el programa
M01	Parar opcionalmente
M02	Reset programa
M03	Encender husillo horario
M04	Encender husillo anti horario
M05	Apagar el husillo
M06	Cambio automático de herramienta
M07	Refrigeración "B" on
M08	Refrigeración "A" on
M09	Apagar refrigeración
M10	Abrir prensa
M11	Cerrar prensa
M13	Husillo hacia adelante y refrigerante encendido
M14	Husillo hacia atrás y refrigerante encendido
M15	Programa de entrada usando MIN P
M19	Orientación del husillo
M20	ATC coger herramienta
M21	ATC sacar herramienta
M22	ATC bajar herramienta
M23	ATC subir herramienta
M24	
M25	
M27	Reset el carrusel al bolsillo uno
M28	Reset el carrusel en la posición del bolsillo
M29	Seleccionar DNC modo
M30	Reset y reactivar programa
M31	Incrementar conteo de partes
M37	Abrir la puerta en una parada
M38	Abrir puerta
M39	Cerrar puerta
M40	Extender atrapado de partes
M41	Retraer atrapado de partes
M43	
M44	
M45	
M48	Mirar porcentaje de avance al 100%

M49	Cancelar M48
M62	Salida auxiliar 1 encendida
M63	Salida auxiliar 2 encendida
M64	Salida auxiliar 1 apagada
M65	Salida auxiliar 1 apagada
M66	Esperar la salida auxiliar 1 encendida
M67	Esperar la salida auxiliar 2 encendida
M68	Lleva al robot a la posición home

Fuente: LARREA ARIAS, Manuel Enrique. Diseño y manufactura asistida por computador (CAD-CAM) en la construcción de pieza con proceso de torneado de control numérico (CNC). Guayaquil, Ecuador. 2010. P. 27. Trabajo de grado (Tecnólogo en Mecánica Industrial). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Instituto de Tecnologías. Tecnología en Mecánica Industrial.

3.3 ANÁLISIS DE LAS FUNCIONES G

3.3.1 G00 Posicionamiento rápido. Son los desplazamientos según el plano de seguridad (Clearance Height) a la máxima velocidad de la máquina. Este plano es el definido por una cota en Z que asegura que la herramienta podrá desplazarse sin chocar con algún obstáculo. No se pueden programar movimientos G00 interpolados en 2 o más planos. Normalmente se programa primero la salida en Z (por ejemplo, al plano de seguridad) y luego en otro bloque, el reposicionamiento en XY. Para este bloque, la máquina buscará primero la cota X y luego la Y. Es decir, no interpolará. Si bien esta modalidad es la más común, puede variar según las diferentes marcas de control numérico.

La función G00 es modal e incompatible con G01, G02, G03, y G33. En algunos controles G00 no anula la última función F programada, en otros si, por lo que hay que volver a programarla luego de la ejecución de un G00.

3.3.2 G01 Interpolación lineal. Pueden ser movimientos con variación simultánea en los 3 ejes. Esto significa que pueden ser trayectorias espaciales no paralelas a ninguno de los ejes. El CNC calculará las velocidades relativas según cada uno de los ejes, de manera que el resultado de la combinación sea una trayectoria rectilínea. El G01 se ejecuta a la F programada, aunque esta puede ser luego variada durante la ejecución del programa. Normalmente F es modal. G01 no puede ser incluida en un mismo bloque con G00, G02, G03 y G33.

3.3.3 G02 Y G03 Interpolaciones circulares CNC. Son trayectorias según arcos de circunferencia. Sólo pueden ejecutarse en un plano determinado: XY, XZ o YZ, En este caso el CNC deberá no sólo calcular las velocidades relativas de cada eje sino también la aceleración y desaceleración de los movimientos para obtener una trayectoria circular. La manera de programarla es la siguiente (para plano XY):

N G02 (G03) X+/-4.3 Y+/-4.3 I+/-4.3 J+/-4.3 F

I y J definen el centro del arco según los ejes X e Y, respectivamente. Normalmente los valores de I y J son incrementales respecto del punto de inicio de la trayectoria circular (o sea el par de cotas X e Y del bloque anterior). Sin embargo esto puede variar según la marca del CNC. En algunos CNC los valores de I y J deben ser programadas en coordenadas absolutas. En los CNC que definen centro en incrementales, puede programarse un G02/G03 incluyendo un G06 en el bloque. Los valores de I y J deben incluirse siempre aunque sean iguales a 0. Normalmente el F es modal para estas funciones. También puede programarse un G02/G03 de la siguiente forma:

N G02 (G03) X+/-4.3 Y+/-4.3 R+/-4.3 F

En este caso no hay definición de I y J sino de R, el radio del arco de circunferencia. Este modo tiene las siguientes limitaciones: no se pueden programar circunferencias completas; si el arco es menor de 180°, R llevará signo positivo (+) y si es mayor llevará signo negativo (-).

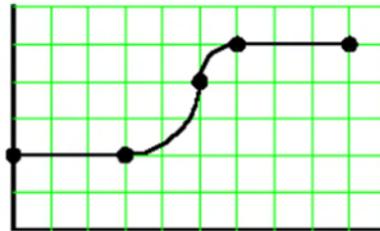
3.3.4 G05 Arista matada. Cuando se incluye un G05 en un bloque, el CNC comienza la ejecución del bloque siguiente durante el periodo de desaceleración del bloque anterior. El resultado es un empalme de trayectorias que producen un redondeado de las inflexiones de la trayectoria. El radio de estos redondeos es proporcional al F. Esta función es modal.

3.3.5 G07 Arista viva. Esta función determina que un bloque no sea iniciado hasta que las cotas del bloque anterior no hayan sido alcanzadas. En este caso se producen inflexiones vivas. Esta función es modal.

3.3.6 G08 Trayectoria circular tangente a la anterior. Permite programar un arco tangente a una trayectoria anterior sin aplicar G02/G03. No es modal. No permite círculos completos.

```
N10 G01 X30 Y20
N20 G08 X50 Y40
N30 G08 X60 Y50
N40 01 X90
```

FIGURA 13: G08 TRAYECTORIA CIRCULAR TANGENTE A LA ANTERIOR

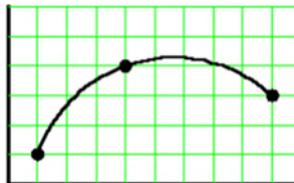


Fuente: LARREA ARIAS, Manuel Enrique. Diseño y manufactura asistida por computador (CAD-CAM) en la construcción de pieza con proceso de torneado de control numérico (CNC). Guayaquil, Ecuador. 2010. P. 27. Trabajo de grado (Tecnólogo en Mecánica Industrial). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Instituto de Tecnologías. Tecnología en Mecánica Industrial.

3.3.7 G09 Trayectoria circular definida por 3 puntos. Permite programar un arco definiendo el punto final y un punto intermedio. El punto inicial es el definido por el bloque anterior. No es modal. No permite círculos completos.

```
N10 G01 X10 Y10  
N20 G09 X90 Y30 I40 J40
```

FIGURA 14: G09 TRAYECTORIA CIRCULAR DEFINIDA POR 3 PUNTOS



Fuente: LARREA ARIAS, Manuel Enrique. Diseño y manufactura asistida por computador (CAD-CAM) en la construcción de pieza con proceso de torneado de control numérico (CNC). Guayaquil, Ecuador. 2010. P. 27. Trabajo de grado (Tecnólogo en Mecánica Industrial). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Instituto de Tecnologías. Tecnología en Mecánica Industrial.

El punto intermedio se programa usando I y J.

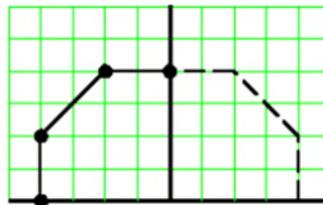
3.3.8 G10, G11, G12, G13 Imágenes espejo. Este tipo de funciones son ayudas que simplifican la programación CNC. En este caso permiten obtener simetrías sin tener que programar todos los movimientos. Las funciones Imagen espejo deben ser entendidas como la ejecución de un bloque anterior con el signo cambiado de la cota correspondiente al eje seleccionado

- G10 Anulación de imagen espejo.
- G11 Espejo según eje X.

- G12 Espejo según eje Y.
- G13 Espejo según eje Z.

N10 G01 X-40 Y20
 N20 X-20 Y40
 N30 X0
 N40 G11
 N50 G25 N10.30
 N60 G10

FIGURA 15: G10, G11, G12, G13 IMAGENES ESPEJO



Fuente: LARREA ARIAS, Manuel Enrique. Diseño y manufactura asistida por computador (CAD-CAM) en la construcción de pieza con proceso de torneado de control numérico (CNC). Guayaquil, Ecuador. 2010. P. 27. Trabajo de grado (Tecnólogo en Mecánica Industrial). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Instituto de Tecnologías. Tecnología en Mecánica Industrial.

Los primeros tres bloques definen una poligonal. N40 llama a ejecutar una Imagen Espejo cambiando las coordenadas en X. N50 indica que se espejarán los bloques desde el N10 al N30 inclusive, G25 es una llamada específica para este tipo de instrucción. En N60, G10 anula la imagen espejo.

3.3.9 G31 Y G32 Guardar recuperar origen de coordenadas. G31 permite guardar el origen de coordenadas que se esté utilizando para establecer un nuevo origen con G53/G59. En caso de ser necesario volver al origen inicial, se programará un G32. Esta función recupera los datos guardados con un G31.

3.3.10 G36 Redondeo controlado de aristas. Permite redondear inflexiones de la trayectoria en forma controlada sin necesidad de programar interpolaciones circulares. Debe programarse en el bloque de la trayectoria cuyo final se quiere redondear. El radio del redondeo debe ser positivo. G36 no es modal.

**N10 G36 R20 G01 X80 Y50
 N20 Y0**

FIGURA 16: G36 REDONDEO CONTROLADO DE ARISTAS

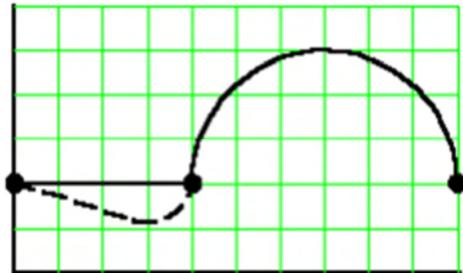


Fuente: LARREA ARIAS, Manuel Enrique. Diseño y manufactura asistida por computador (CAD-CAM) en la construcción de pieza con proceso de torneado de control numérico (CNC). Guayaquil, Ecuador. 2010. P. 27. Trabajo de grado (Tecnólogo en Mecánica Industrial). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Instituto de Tecnologías. Tecnología en Mecánica Industrial.

3.3.11 G37 Entrada tangencial. Esta función permite empalmar tangencialmente la trayectoria definida en el bloque siguiente. Se utiliza para evitar que la herramienta deje marcas indeseables en la pieza. Es el caso típico de mecanizado de superficies convexas (ej. machos) en los que la herramienta ataca lateralmente al material.

```
N10 G37 R10 G01 X40 Y20  
N20 G02 X100 Y20 I30 J0
```

FIGURA 17: G37 ENTRADA TANGENCIAL



Fuente: LARREA ARIAS, Manuel Enrique. Diseño y manufactura asistida por computador (CAD-CAM) en la construcción de pieza con proceso de torneado de control numérico (CNC). Guayaquil, Ecuador. 2010. P. 27. Trabajo de grado (Tecnólogo en Mecánica Industrial). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Instituto de Tecnologías. Tecnología en Mecánica Industrial.

La trayectoria resultante es la de la línea punteada. Sólo se puede programar G37 en un G01 o en un G00. $R=2r$ de la fresa o mayor.

3.3.12 G38 Salida tangencial. Permite salir tangencialmente de una trayectoria. Se utiliza para evitar que la herramienta deje marcas indeseables en el mecanizado de piezas convexas.

```
N10 G38 R10 G02 X60 Y20 I30 J0  
N20 G01 X100
```

FIGURA 18: G38 SALIDA TANGENCIAL



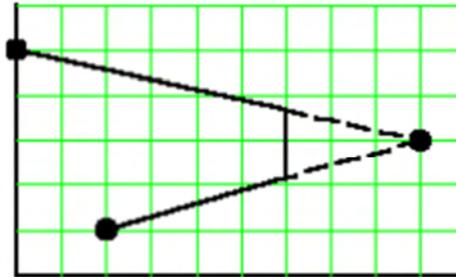
Fuente: LARREA ARIAS, Manuel Enrique. Diseño y manufactura asistida por computador (CAD-CAM) en la construcción de pieza con proceso de torneado de control numérico (CNC). Guayaquil, Ecuador. 2010. P. 27. Trabajo de grado (Tecnólogo en Mecánica Industrial). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Instituto de Tecnologías. Tecnología en Mecánica Industrial.

La trayectoria resultante es la de la línea punteada. G38 debe programarse en el bloque del que se sale.

3.3.13 G39 Achaflanado. Esta función permite empalmar dos trayectorias rectas mediante una tercera, también recta, sin necesidad de calcular los puntos de intersección.

```
N10 G39 R30 G01 X90 Y30  
N20 X20 Y10
```

FIGURA 19: G39 ACHAFLANADO



Fuente: LARREA ARIAS, Manuel Enrique. Diseño y manufactura asistida por computador (CAD-CAM) en la construcción de pieza con proceso de torneado de control numérico (CNC). Guayaquil, Ecuador. 2010. P. 27. Trabajo de grado (Tecnólogo en Mecánica Industrial). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Instituto de Tecnologías. Tecnología en Mecánica Industrial.

R especifica la distancia entre el comienzo y el final del chaflán y la intersección de las dos trayectorias.

3.3.14 G40. G41 Y G42 Compensación de radios de herramienta.

- G40 Anulación de Compensación de Radio de herramienta.
- G41 Compensación de Radio a la derecha de la trayectoria.
- G42 Compensación de Radio a la izquierda de la trayectoria.

Supongamos que se quiere mecanizar un cubo de 100 mm. de lado con una fresa de diámetro 20. Como las trayectorias de CNC están definidas por el 'Tipo' de la herramienta (su punto central más bajo), habría que recalcular la trayectoria 10 mm, por fuera del cubo. De no hacerlo así, y de programar por las líneas que definen el cubo, se obtendría una forma de 90 mm, de lado. Recalcular las trayectorias para obtener un cubo puede no resultar difícil. Pero hacerlo para una forma compleja puede ser muy complicado. Aplicando las funciones de Compensación de Radio, no es necesario este recalcular. Para ello la herramienta debe estar especificada en el inicio del programa con el formato Txx.yy. El valor xx es el número de dos dígitos con el que determinada herramienta está archivada (en el momento en el que se configura el CNC puede crearse una tabla de herramientas disponibles). yy es un valor de corrección del B nominal de la herramienta. Estas correcciones son normalmente necesarias por cuestiones de desgaste. Estos valores de corrección también están archivados en la memoria permanente del CNC.

Programados un G41/G42 podrán programarse las trayectorias según las dimensiones finales de la pieza. Deben ser incluidos en el bloque anterior a aquel que se quiera ejecutar con compensación. Estas funciones son anuladas por un

G40. Esta anulación debe ser incluida en el bloque que define la última trayectoria compensada. Sólo se puede incluir un G40 en una trayectoria rectilínea.

3.3.15 G53 A G59 Traslados de origen. En ciertos trabajos de mecanizado puede resultar útil trasladar el origen de coordenadas a otro punto de la pieza, por ejemplo, cuando se quiere repetir una forma en otro(s) lugar(es). Normalmente en un único programa se pueden introducir hasta 7 cambios de origen. El formato de aplicación es el siguiente:

N10 G53 X... Y... Z... (Se crea un nuevo origen)
N10 G53 (se aplica el nuevo origen creado en el bloque anterior)

Estas funciones se usan normalmente en combinación con G31/G32 (ya analizadas).

3.3.16 G72 Factor de escalado. Esta función permite agrandar o achicar las dimensiones de una pieza sin cambiar el programa. Se puede aplicar de dos maneras

N10 G72 K+/-2.4

K es el factor por el que se multiplicarán todas las cotas. Este modo escala la pieza según los tres ejes.

N10 G72 X+/-2.4 (por ejemplo)

Este modo escalará la pieza según el factor K sólo en el eje X. De la misma manera pueden escalarse Y o Z. Normalmente esta función no debe aplicarse en programas que apliquen compensaciones de herramienta.

3.3.17 G73 Rotación del sistema de coordenadas. Esta función es una ayuda de programación similar a las de espejado. En este caso permiten reproducir un mecanizado ya programado rotándolo respecto del origen de coordenadas.

N10 G03 X-50 I-15 J0
N20 G01 X-20
N30 G73 A-45
N40 G25 N10.20.3

FIGURA 20: G73 ROTACION DEL SISTEMA DE COORDENADAS



Fuente: LARREA ARIAS, Manuel Enrique. Diseño y manufactura asistida por computador (CAD-CAM) en la construcción de pieza con proceso de torneado de control numérico (CNC). Guayaquil, Ecuador. 2010. P. 27. Trabajo de grado (Tecnólogo en Mecánica Industrial). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Instituto de Tecnologías. Tecnología en Mecánica Industrial.

A es el ángulo de rotación. En el ejemplo tiene el signo menos (-) porque la programación CNC toma por defecto como positivo el sentido anti horario, y como negativo el sentido horario. La función G25 llama a repetirse a los bloques definidos por N, o sea los bloques del 10 al 20. El tercer dígito (3) indica la cantidad de veces que se repetirá la rotación. Nótese que el valor de A es incremental.

3.3.18 G81 Taladrado. Los bloques de ciclo fijo de taladrado tienen la siguiente conformación:

N4 G81 G98/99 X/Y/Z+/-4.3 I+/-4.3 K2.2 N2

- **G?**: Código del ciclo fijo.
- **G88**: Retroceso al plano de referencia (normalmente ubicado cerca de la superficie de la pieza).
- **G99**: Retroceso al plano de seguridad (ya explicado).
- **X/Y/Z**: Si se trabaja en el plano XY (G17), X e Y definen el punto donde se hará la primera perforación. Z define el plano de referencia antes mencionado. Si se trabaja en absolutas, Z define la distancia desde el cero pieza. Si se trabaja en incrementales, Z define la distancia desde el plano de seguridad.
- **I**: Define la profundidad de la perforación. Si se trabaja en absolutas I define la distancia desde el cero pieza. Si se trabaja en incrementales I define la distancia desde el plano de referencia
- **K**: Define el tiempo de espera en el fondo de la perforación antes de iniciarse el retroceso. Valores en segundos.
- **N**: Define el número de veces que se repetirá el Ciclo Fijo. Si no se programa N, el ciclo se ejecuta N1 repeticiones mayores a 1. Sólo tiene sentido si se trabaja en incrementales.

3.3.19 G83 Taladrado profundo. Este tipo de ciclo fijo se aplica cuando, por la profundidad de la perforación es necesario levantar cíclicamente la broca para que se descargue la viruta. Los bloques de ciclo fijo de taladrado profundo tienen dos conformaciones posibles.

- La primera es:

N4 G83 G98/99 X/Y/Z+/-4.3 I+ 4.3 J2 N2

La diferencia con G81 está en que I define cada cota de penetración en incrementales. J define la cantidad de penetraciones según el incremento I.

- La segunda es:

N4 G83 G98/99 X/Y/Z+/-4.3 I+/-4.3 B4.3 C4.3 D4.3 H4.3 J2 K2.2

- **I:** Profundidad total del mecanizado. En absolutas, respecto del cero pie. En incrementales, respecto del plano de referencia.
- **B:** Profundización incremental para cada paso (valor positivo).
- **C:** Distancia de la profundización anterior para bajar en G00.
- **D:** Distancia entre el plano de referencia y la superficie de la pieza.
- **H:** Distancia de retroceso en G00. Si no figura retrocede hasta PR.
- **J:** Cada cuentas penetraciones hay retroceso hasta PR.
- **K:** Tiempo en segundos antes de iniciarse un retroceso.

3.3.20 G87 Cajera rectangular. Se denomina Cajeras (Pockets) a las operaciones de vaciado de formas cerradas. Pueden ser Cajeras Rectangulares o Cajeras Circulares. En estas operaciones la herramienta no sólo recorre el contorno de la figura sino que además realiza todos los movimientos necesarios para retirar el material comprendido dentro de la figura. El formato del bloque de esta función es el siguiente:

N4 G87 X/Y/Z+/-4.3 I+/-4.3 J+/-4.3 K+/-4.3 B4.3 C4.3 D4.3 N2

- **X/Y/Z:** Cotas del centro de la cajera.
- **I:** Profundidad total de la cajera. En absolutas, respecto del cero pieza. En incrementales, respecto del plano de referencia.
- **J:** Distancia en X desde el centro al borde de la cajera.
- **K:** Distancia en Y desde el centro al borde de la cajera.
- **B:** Profundización incremental por pasada.
- **C:** Incremento lateral (Stepover).
- **D:** Distancia entre el PR y la superficie de la pieza.
- **N:** Número de veces que se repetirá el ciclo. Sólo en G91.

3.3.21 G88 Cajera circular. Tiene el mismo formato de la Cajera Rectangular. Se diferencia en que J define el radio de la cajera y no se incluye el valor K.

- **D:** Distancia entre el PR y la superficie de la pieza.
- **N:** Número de veces que se repetirá el ciclo. Sólo en G91.

3.4 PUERTO PARALELO

El puerto paralelo es la interfaz entre una computadora y un periférico, en este caso la máquina CNC, cuya principal característica es que los bits de datos viajan juntos, enviando un paquete de bytes a la vez. Es decir, se implementa un cable o una vía física para cada bit de datos formando un bus. Mediante el puerto paralelo podemos controlar también periféricos como focos, motores entre otros dispositivos, adecuados para automatización.

Fue diseñado por IBM para manejar impresoras desde su gama de microcomputadores PC/XT/AT. Un conector estándar macho de 25 pines aparecía en la parte trasera del PC con el solo propósito de servir de interfaz con la impresora. El sistema operativo DOS cargado en dichos PC soportaba hasta tres puertos paralelos asignados a los identificadores LPT1, LPT2 y LPT3, y cada puerto requería de tres direcciones consecutivas del espacio de E/S (entrada-salida) del procesador para seleccionar todas sus posibilidades.

Figura 21. Conectores DB25 macho y hembra.

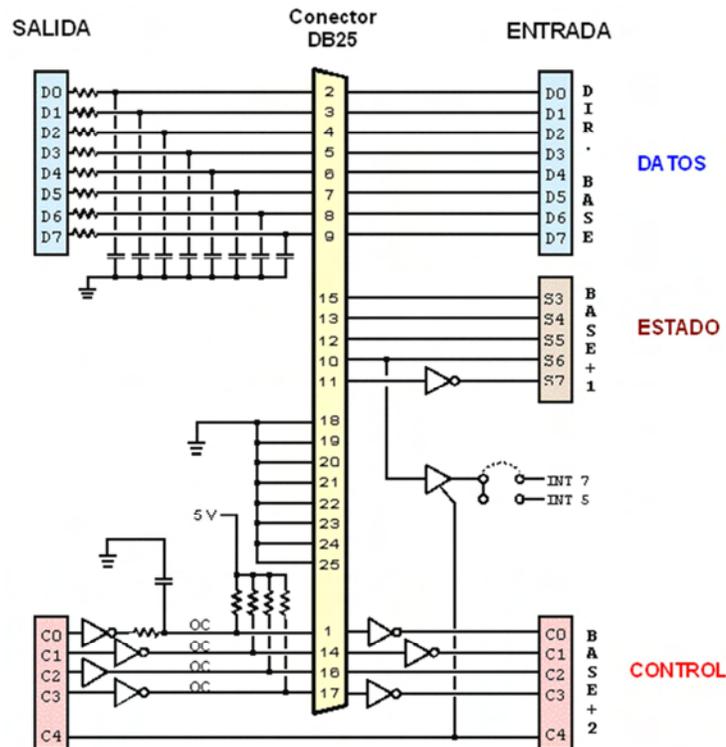


Fuente: GONZALES, Karla. Ensamblaje de PC: Puerto Paralelo [en línea]. <http://youkarlitha.blogspot.com/2011/09/puerto-paralelo.html>. [citado el 22 de febrero de 2012]

Desde el punto de vista del hardware, el puerto consta de un conector hembra DB25 con doce salidas latch (poseen memoria con un buffer intermedio) y cinco entradas, con ocho líneas de tierra. Desde el punto de vista del software, el puerto

paralelo consta de tres registros (datos, estado y control) de 8 bits cada uno, que ocupan tres direcciones de E/S (I/O) consecutivas de la arquitectura x86.

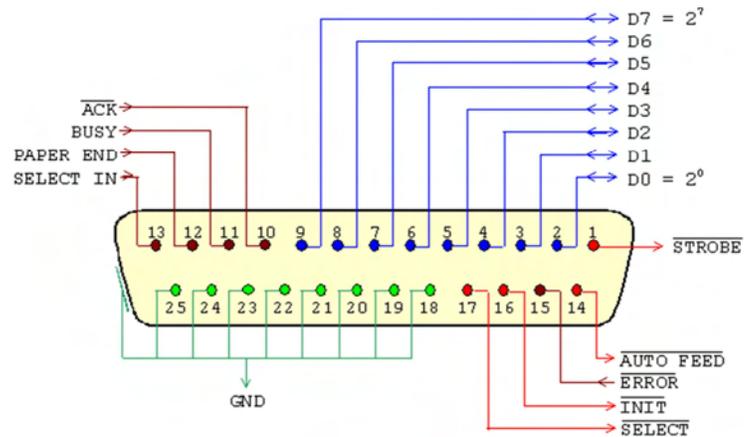
FIGURA 22. Arquitectura puerto paralelo



Fuente: CENTRO DE FORMACION DEL PROFESORADO E INNOVACION EDUCATIVA DE VALLADOLID. El puerto paralelo del PC [en línea]-http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/control/puerto_paralelo.htm#arriba. [citado el 22 de febrero de 2012]

3.4.1 Descripción del conector físico. La conexión del puerto paralelo al mundo exterior se realiza mediante un conector hembra DB25. Observando el conector de frente y con la parte que tiene mayor número de pines hacia arriba, se numera de derecha a izquierda y de arriba a abajo, del 1 al 13 (arriba) y del 14 al 25 (abajo).

Figura 23. Descripción de pines del puerto paralelo



Fuente: CENTRO DE FORMACION DEL PROFESORADO E INNOVACION EDUCATIVA DE VALLADOLID. El puerto paralelo del PC [en línea]- http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/control/puerto_paralelo.htm#arriba. [citado el 22 de febrero de 2012]

En este conector:

- 8 líneas (pines) son para salida de datos (bits de DATOS). Sus valores son únicamente modificables a través de software, y van del pin 2 (dato 0, D0) al pin 9 (dato 7, D7).
- 5 líneas permiten la entrada de datos (bits de ESTADO), únicamente modificables a través del hardware externo. Estos pines son: 10, 11, 12, 13 y 15, del más al menos significativo.
- 4 líneas son de control (bits de CONTROL), numerados del más significativo al menos: 17, 16, 14 y 1. Habitualmente son salidas, aunque se pueden utilizar también como entradas y, por tanto, se pueden modificar tanto por software como por hardware.
- Las líneas de la 18 a la 25 son la tierra.

En la siguiente tabla se detallan la nomenclatura, descripción y función de cada línea. La columna E/S (entrada/salida) se refiere al dato visto desde el lado del PC.

Tabla 11. Detalle de pines en el puerto paralelo.

DB25 pin	Tipo (E/S)	Señal	Descripción
1	S	Strobe	Si está bajo más de 0.5 μ s, habilita a la impresora para que reciba los datos enviados.
2	S	D0	Bit 0 de datos, bit menos significativo (LSB)

3	S	D1	Bit 1 de datos
4	S	D2	Bit 2 de datos
5	S	D3	Bit 3 de datos
6	S	D4	Bit 4 de datos
7	S	D5	Bit 5 de datos
8	S	D6	Bit 6 de datos
9	S	D7	Bit 7 de datos, bit más significativo (MSB)
10	E	Ack	Un pulso bajo de 11 μ s indica que se han recibido datos en la impresora y que la misma est preparada para recibir más datos.
11	E	Busy	En alto indica que la impresora est ocupada.
12	E	PaperEnd	En alto indica que no hay papel.
13	E	SelectIn	En alto para impresora seleccionada.
14	S	AutoFeed	Si está bajo, el papel se mueve una línea tras la impresión.
15	E	Error	En bajo indica error (no hay papel, est fuera de línea, error no det.).
16	S	Init	Si se envía un pulso en bajo > 50 μ s la impresora se reinicia.
17	S	Select	En bajo selecciona impresora (en gral. no se usa, ya que SelectIn se fija a alto).
18-25		GND	Masa retorno del par trenzado.
18-25			Masa lógica y chasis

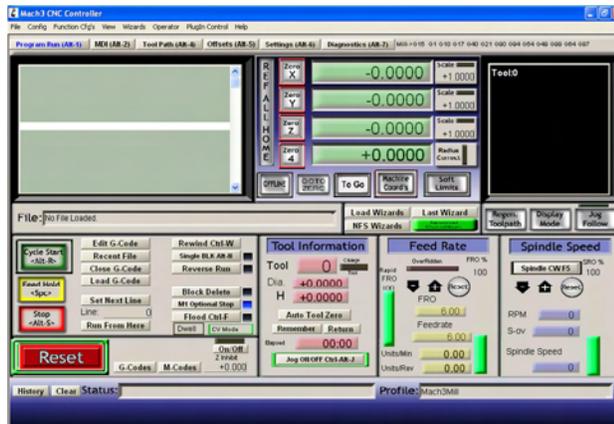
FUENTE: Esta investigación

3.5 SOFTWARE MACH3

Mach3 es un potente software CNC, desarrollado por la empresa norteamericana Artsoft. En sus inicios fue desarrollado originalmente para trabajos caseros, pero rápidamente se convirtió en uno de los más versátiles y completos paquetes de control numérico, utilizado inclusive en la industria. Con este software, se realiza el control de la máquina CNC, enviando las señales a través del puerto paralelo. Entre otras cosas Mach3 permite:

- El control de hasta dos puertos paralelos.
- El control integral de hasta seis ejes.
- Importar archivos DXF, BMP, JPG, HPGL.
- Generar código G utilizando la herramienta Lazycam
- Control de velocidad del husillo.
- Control independiente de los ejes.

Figura 24. Ventana de inicio Mach3.

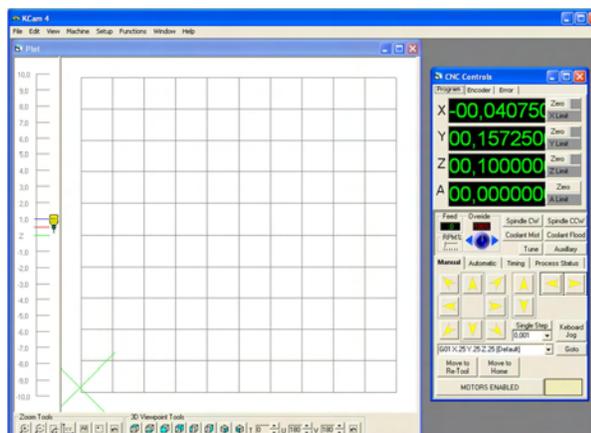


FUENTE: Esta investigación

3.6 SOFTWARE KCAM4

Software CNC desarrollado por la empresa KellyWare, es enfocado para el mecanizado de piezas en máquinas CNC de bajo costo. Permite la importación de archivos DXF, NC y PLT. Posee editor de código G y visor para gráficas 3D. Con este programa también es posible el control de la máquina CNC, demostrando la escalabilidad de la misma.

Figura 25. Pantalla de bienvenida KCAM4.



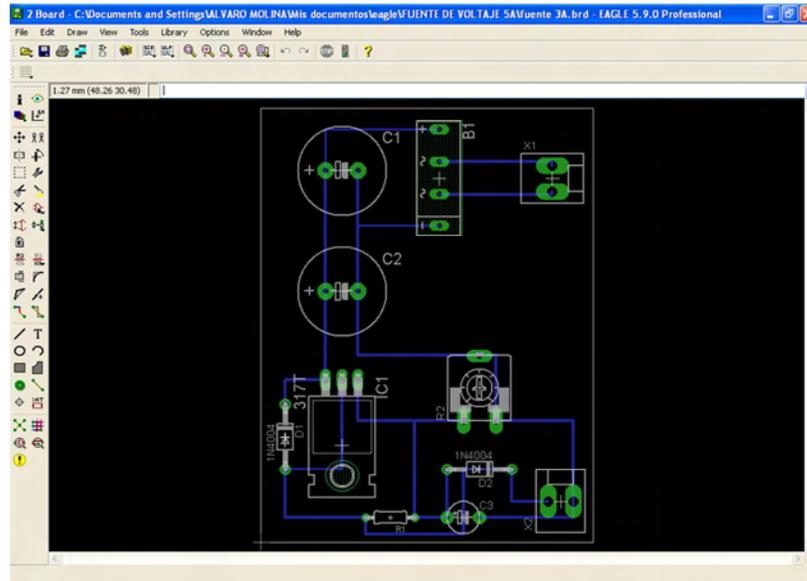
FUENTE: Esta investigación

3.7 SOFTWARE EAGLE PCB DESIGN

Potente software dedicado a la edición de placas de circuito impreso. Posee editor de esquemáticos, editor de placas y una extensa librería de componentes. Dentro de sus características más sobresalientes se encuentran la exportación 3D del esquemático y placas realizadas, así como la ejecución de ULP para la

programación de secuencias, simulaciones y manipulación de datos (E/S). Con este software se crean los diseños de placas de circuito impreso que serán mecanizados en la máquina.

Figura 26. Diseño de PCB en Eagle.



FUENTE: Esta investigación

4 DESARROLLO PRELIMINAR

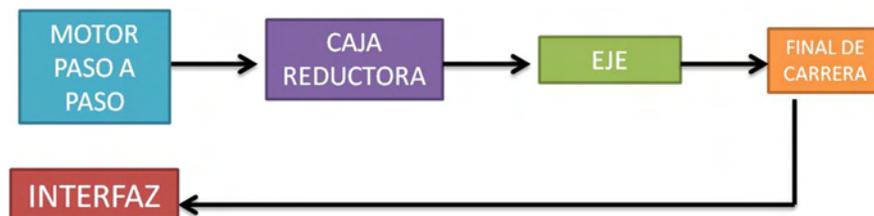
Después de realizar una profunda revisión del marco teórico y los elementos esenciales para la implementación del prototipo CNC, se define realizar un diseño modular, abordando el desarrollo de la máquina desde un punto de vista funcional, identificando los módulos como Mecánica, Interfaz, Drivers de control y potencia, Software de control numérico y sistema de alimentación. En este capítulo se describe la función de cada modulo así como la interdependencia que existe entre cada uno de ellos.

4.1 MECANICA

Este módulo se refiere a todos los elementos que permiten el movimiento de la máquina en sus tres ejes X, Y, Z. Cada eje es controlado independientemente y cuenta con un motor paso a paso y un sistema de transmisión que proporciona el torque suficiente para realizar el movimiento de la máquina independientemente del lugar donde se encuentre posicionada. En el desarrollo de esta parte se decide reciclar “carros de desplazamiento” de escáneres e impresoras en desuso, ya que el sistema al solo ser un prototipo, solo se requiere para realizar pruebas y demostrar el buen funcionamiento del resto de módulos.

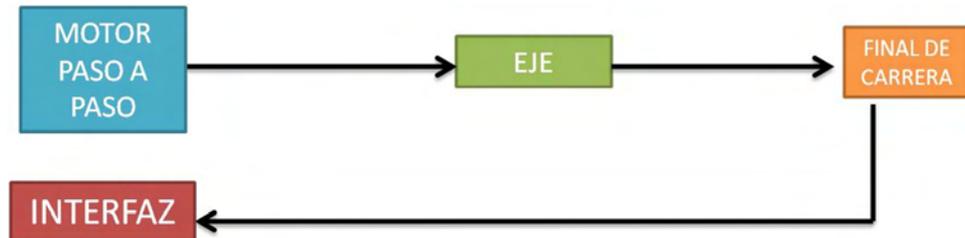
Para el movimiento de los ejes, se utilizan motores paso a paso, quienes proveen la velocidad y torque necesarios para realizar los desplazamientos. El sistema de transmisión para los ejes X, Y, se encarga de reducir la velocidad del motor a la vez que suaviza el paso de los motores y de aumentar el torque rotacional, ya que se encuentra compuesto por una caja reductora, con lo que se consigue además de la ganancia mecánica, una mayor precisión de posicionamiento de la herramienta. En el eje Z, el motor se une directamente al eje por medio de una correa dentada. En las siguiente figuras 27 y 28 se muestran respectivamente los diagramas de bloques de las partes mecánicas de cada uno de los ejes.

Figura 27. Diagrama de bloques ejes X, Y



FUENTE: Esta investigación

Figura 28. Diagrama de bloques eje "Z"

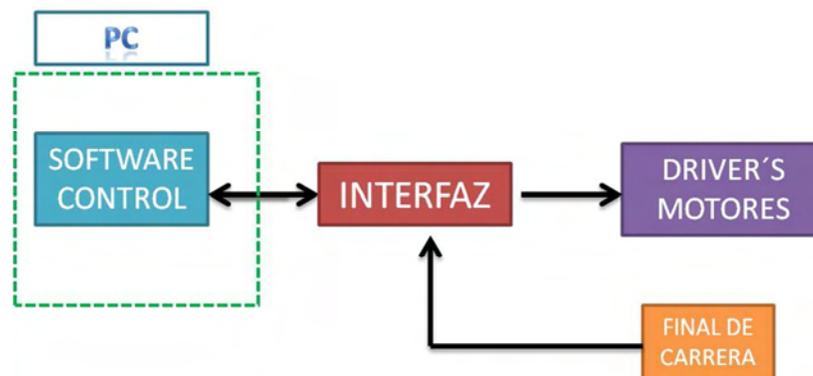


FUENTE: Esta investigación

4.2 INTERFAZ

Esta parte se encarga de establecer la comunicación efectiva entre el software de control numérico y el prototipo de máquina CNC. Este modulo es capaz de manejar información en forma bidireccional, tanto desde el software hacia los drivers de control de motores y desde los finales de carrera hacia el PC. Por otro lado, desde la interfaz es posible controlar el modo de funcionamiento de los motores paso a paso, es decir, si el motor va a funcionar en medio paso o paso completo. De la misma forma desde la interfaz es posible controlar el encendido/apagado de elementos externos a la máquina, pero que resultan importantes a la hora de realizar largos procesos de fresado y taladrado, tales como bombas de agua, aspiradoras, bombas de aire, etc.

Figura 29. Diagrama de bloques enlace.



FUENTE: Esta investigación

Esta interfaz a la vez de realizar las anteriores funciones, también cumple el importante papel de proteger y aislar el puerto paralelo del computador del modulo de potencia, y así evitar un daño en el puerto por posibles fallas en los actuadores o demás elementos del sistema. Esto se hace ya que es más económico reemplazar la interfaz, que adquirir un puerto paralelo adicional o en el peor de los casos, adquirir una board nueva, en caso de presentarse un daño.

4.3 DRIVER'S DE CONTROL Y POTENCIA

Esta fase es un circuito electrónico capaz de generar las señales de excitación en el orden adecuado de los MOSFET de potencia, de acuerdo con las señales que provienen desde el software de control a través de la interfaz. Este circuito, especialmente diseñado para motores paso a paso unipolares, aplica las señales de activación de los transistores MOSFET en el orden detallado en el marco teórico, a la vez que realiza un control de la corriente entregada a cada una de las fases de los motores. Este control es de vital importancia para evitar el sobrecalentamiento de los actuadores.

Tal y como muestra el diagrama de bloques de la siguiente figura, el driver de control y potencia establece comunicación entre los motores paso a paso presentes en cada eje y la interfaz que trae las señales de control provenientes desde el computador.

Figura 30. Diagrama de bloques control y potencia.



FUENTE: Esta investigación

4.4 SOFTWARE DE CONTROL NUMERICO

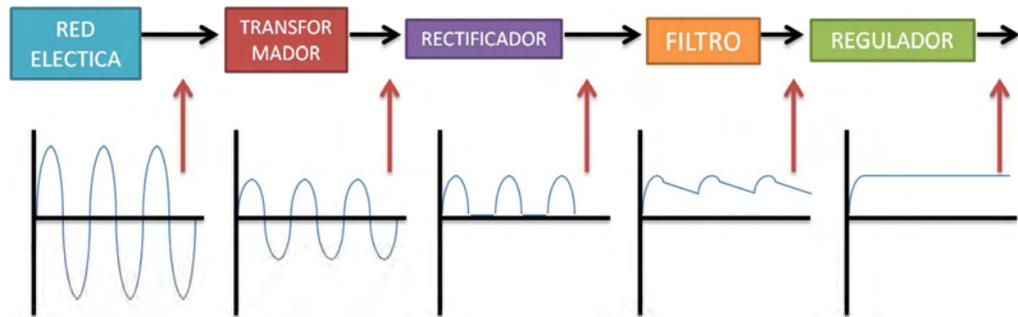
Es un software dedicado a la edición y ejecución de rutinas de código G. Este programa se encarga de generar los pulsos necesarios para el posicionamiento adecuado de cada uno de los tres ejes, así como generar una rutina de parada en caso que la parada de emergencia o uno de los interruptores finales de carrera sean accionados. Es importante destacar que el programa no solamente se encarga de posicionar los motores, también realiza cálculos para una aceleración y desaceleración con suavidad, realizar interpolación lineal de los movimientos en los ejes X y Y, establecer la velocidad máxima de desplazamiento de cada uno de los ejes, así como la precisión para ubicar la herramienta por cada motor, etc.

4.5 SISTEMA DE ALIMENTACION

Para el suministro de energía a la máquina, se necesita una fuente DC capaz de entregar la potencia necesaria para activar cada una de las fases de los motores, pero que a la vez sea lo suficientemente estable para encender la interfaz y las

tarjetas controladoras de los motores. En este punto se elige una fuente regulada ajustable DC, por su capacidad de potencia y su bajo costo de implementación, además que los requerimientos de espacio son muy pocos. La siguiente figura muestra el diagrama de bloques de una fuente DC regulada típica, de igual forma muestra cómo se va acondicionando la señal de entrada AC, a un voltaje continuo DC.

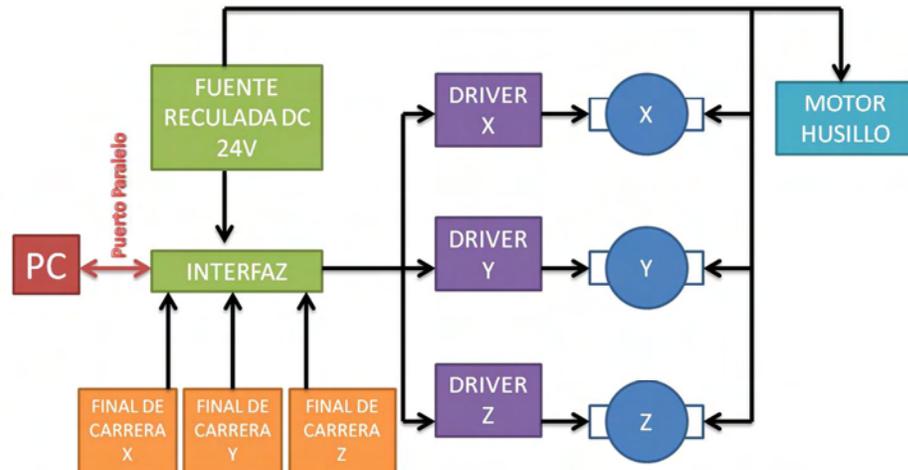
Figura 31. Diagrama de bloques sistema de alimentación.



FUENTE: Esta investigación

5 DISEÑO PROTOTIPO MAQUINA CNC

Figura 32. Diagrama de bloques de la máquina CNC.



FUENTE: Esta investigación

El proceso de control para el maquinado de las placas de circuito impreso se basa en el diagrama de bloques de la anterior figura.

5.1 EQUIPO DE CÓMPUTO

Para seleccionar el equipo de cómputo adecuado, planteamos dos requerimientos mínimos:

- El PC debe disponer del puerto paralelo completamente funcional.
- El computador debe ser capaz de ejecutar tanto los programas para diseñar las placas de circuito impreso, como el software de control encargado de correr las rutinas de código G.

Para el diseño de las placas se ha optado por utilizar el software Eagle PCB Layout, de la empresa Cadsoft. Se selecciona este software de edición, por su extensa librería de componentes y por su facilidad de uso. Además el programa permite la ejecución de ULP (User Language Program), por medio de los cuales, se genera el código G para su posterior ejecución por parte del software de control numérico.

Los requerimientos mínimos para la ejecución de Eagle son:

- PC compatible (486 o superior) con Windows 95/98 o superior.
- Espacio en disco de 50 megabytes

- Resolución gráfica mínima de 800x600 pixeles

Para la ejecución del código se ha planteado el uso de dos programas, esto con el fin de mostrar la escalabilidad del sistema diseñado. Mach3 y KCam4 son los programas elegidos para ejecutar el código G. Los requerimientos mínimos en ambos programas son similares:

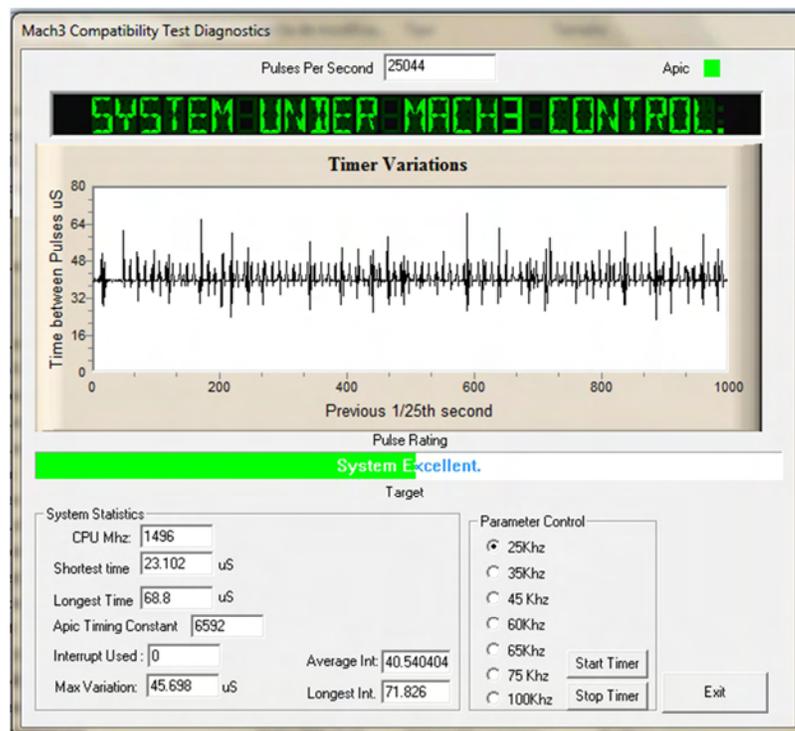
- Windows 2000 o superior
- Procesador 1GHz
- 256Mb de RAM

Realizado el análisis de los requerimientos mínimos necesarios para ejecutar todos los programas, se decide utilizar el siguiente equipo de cómputo:

- Pentium IV a 3GHz,
- 256MB en RAM,
- Disco duro de 80Gb, con 7Gb de espacio libre.

El puerto paralelo de este PC es probado con una pequeña aplicación llamada "Drivertest.exe", incluida en el paquete de Mach3 la cual arroja un análisis positivo del puerto paralelo, detallada en la siguiente figura.

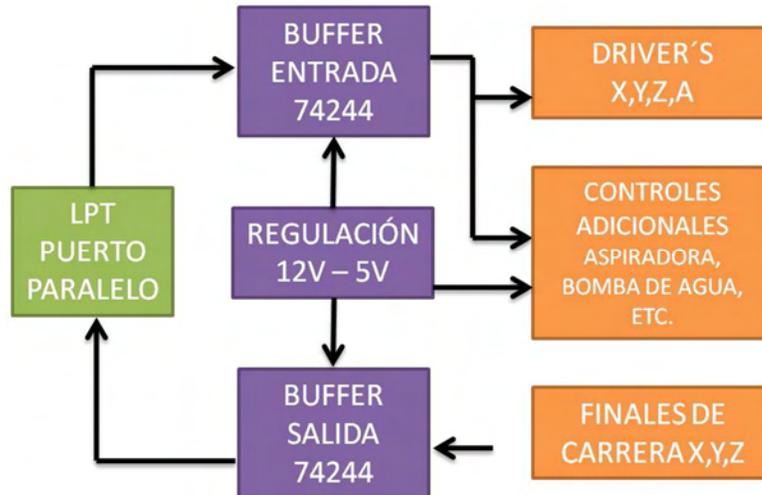
Figura 33. Prueba funcionamiento puerto paralelo.



FUENTE: Esta investigación

5.2 INTERFAZ PC-MAQUINA CNC

Figura 34. Diagrama de bloques interfaz PC-Máquina CNC.



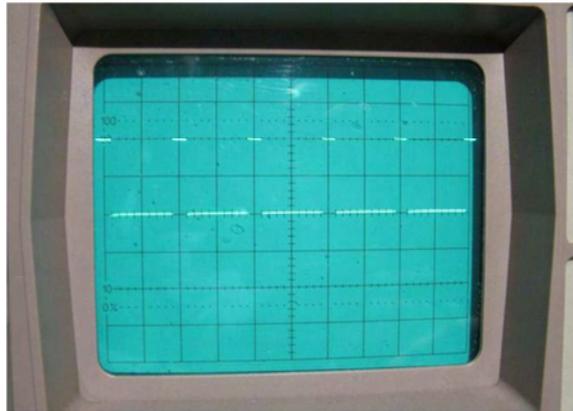
FUENTE: Esta investigación

En el diseño y posterior implementación de la interfaz se tuvieron en cuenta las siguientes premisas:

- La interfaz debe ser capaz de comunicar la máquina fresadora con el PC en forma bidireccional, tanto para permitir el envío de las señales a los motores provenientes del computador, como para captar las señales de los finales de carrera de cada uno de los ejes y entregarle en forma digital estas señales al computador.
- La interfaz debe ser capaz de manejar cuatro ejes, los tres ejes actualmente utilizados y uno más para una posible ampliación de los alcances de la máquina.
- Mediante la interfaz se podrá controlar independiente cada eje, la configuración de paso de los motores, ya sea full drive, wave drive o medio paso.
- La interfaz también será capaz de controlar el encendido y apagado de elementos adicionales como bombas de agua, aspiradoras, bombas de aire, etc.
- El puerto que utilizará la interfaz será el puerto paralelo.

Con estas premisas, se comenzó diseñando el bloque que aislará y protegerá el puerto paralelo de la impresora a la vez que permitirá el paso de las señales provenientes del software CNC encargado de enviar la posición de la fresa. Para esto se tuvo en cuenta el tipo de señal enviada por el software, en cuanto a frecuencia, amplitud y la disposición de los pines para el control de velocidad, dirección de giro y habilitación.

Figura 35. Forma de onda proveniente del software Mach3.



FUENTE: Esta investigación

Mach3 puede manejar hasta 6 ejes a la vez, si se dispone de dos puertos paralelos, y puede trabajar hasta una velocidad de 25KHz, de tal manera que se hace necesario que el bloque de protección del puerto paralelo trabaje perfectamente a esta frecuencia. La manera de controlar la posición y ubicación de los motores por parte de este software es utilizando un pin, que según la frecuencia de los pulsos, para controlar la velocidad de los motores y un segundo pin que según su estado, ya sea cero o uno, indica la dirección de movimiento de los ejes.

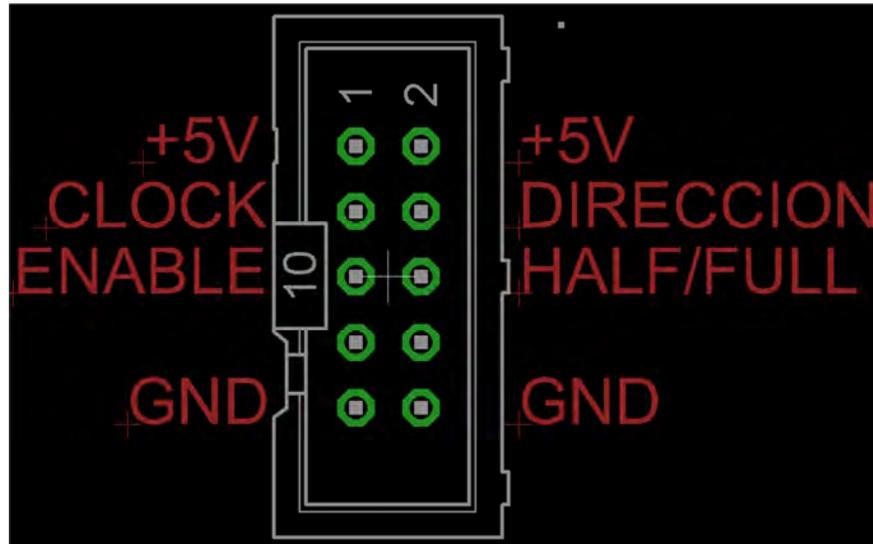
Teniendo esto presente, se inicio la búsqueda de los elementos necesarios para aislar y proteger el puerto paralelo. En primer lugar se pensó en utilizar opto acopladores para realizar esta tarea, pero la disponibilidad de estos elementos de rápida respuesta en la región no es muy buena. Por otro lado, la idea es realizar una interfaz compacta, y al analizar la necesidad de pines que se iban a utilizar del puerto paralelo, se concluyo que serian necesarios 16 opto acopladores para realizar la tarea, por lo que se descarto completamente el uso de estos elementos para aislar el puerto.

Se optó por el integrado HD74LS244 que es un buffer unidireccional octal tri-estado, económico que puede alcanzar frecuencias de trabajo de hasta 70Mhz. En un mismo chip vienen incorporados ocho de estos buffer, por lo cual solo se hace necesario dos de estos elementos para enviar y recibir todas las señales, puesto que el software mediante el puerto paralelo realiza el control de dirección y sentido de giro, pero también debe recibir las señales de alto provenientes de los finales de carrera.

Para realizar la conexión entre la interfaz y los driver de control de motores de cada eje, se utilizaron conectores IDC10H, ya que solo permiten conectarse de una forma, evitando así una posible conexión inversa de los driver generando daños en los mismos. De igual forma los cables para este tipo de conector son

muy fáciles de armar, no es necesario realizar soldaduras, simplemente se toma el cable en la mano, del tipo correa de diez conductores, se insertan en la clavija hembra y se presiona con fuerza. En la siguiente figura se puede apreciar la función de cada pin en el conector IDC10H.

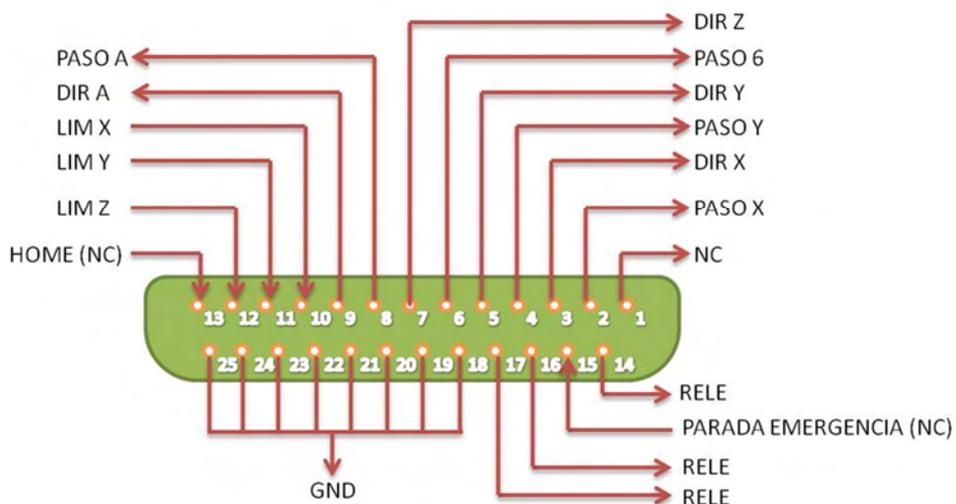
Figura 36. Configuración de pines conector IDC10H.



FUENTE: Esta investigación

Después de realizar un análisis de los datos que se van a enviar y recibir por el puerto paralelo, teniendo en cuenta cuantos ejes se van a controlar, así como cuantos finales de carrera se van a disponer en la máquina se definen la disposición y función de los pines, la cual se muestra en la siguiente figura.

Figura 37. Configuración de Pines, Puerto Paralelo.



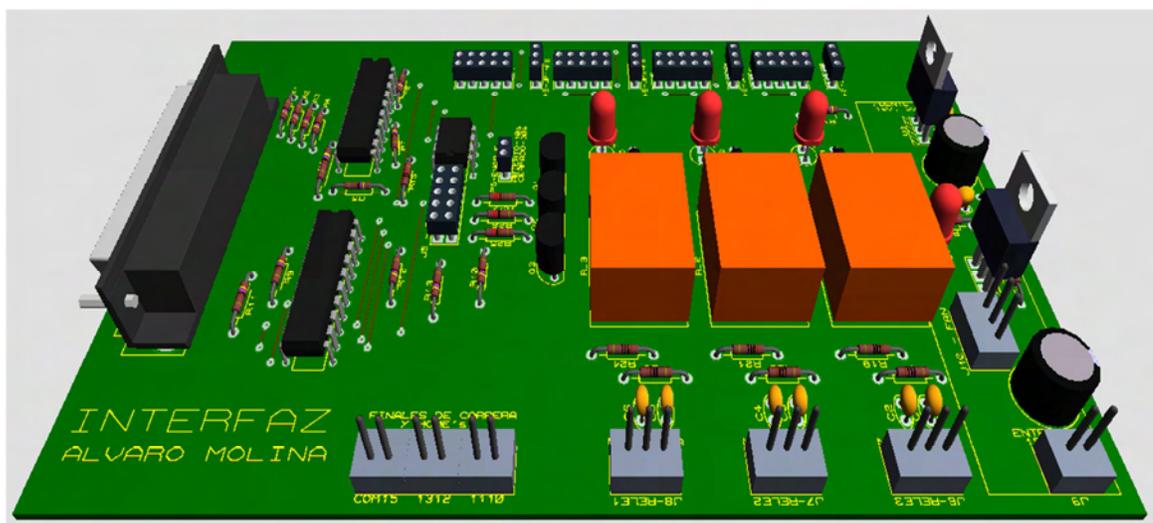
FUENTE: Esta investigación

Como se puede apreciar en la figura anterior, existen dos pines de control para cada eje, dirección y paso, pero para el caso de los seis finales de carrera que me controlan los topes de cada eje, solo se dispone de tres pines de entrada. Los sensores los conectamos por pares, es decir el límite “XX--” con “X++”, el “Y--” con “Y++” y el “Z--” con “Z++”, de esta forma cuando la máquina llegue a estos topes detiene automáticamente la ejecución del código G para evitar daños mecánicos y/o electrónicos. Mach3 para evitar que la máquina continúe en la misma dirección que traía antes de llegar a los topes, cambia automáticamente el estado del pin de dirección del eje del sensor activado y se debe retroceder manualmente un paso a la máquina. Para el caso de los sensores “home”, que me indican el cero de referencia de la máquina y para lo cual solo disponemos de un pin de control, conectamos los tres “home” en paralelo al pin 13, correspondientes a los tres ejes y al indicarle al Mach3 que se dirija al home de la máquina, este software lo hace de un solo eje por vez, así al detectar la activación del sensor del “home” del primer eje, detiene el movimiento en dicho eje, retrocede un paso y realiza el mismo procedimiento con el segundo y tercer eje.

Durante el diseño se define realizar la alimentación de los drivers directamente desde la interfaz, para no tener que realizar una regulación en cada driver, también se define ubicar en la misma la selección de forma de paso de los motores, ya sea full drive, wave drive o medio paso, esto se realizará mediante el cambio de posición de los jumpers de selección.

En la siguiente figura se muestra la simulación 3D de la placa de interfaz completamente terminada, desarrollada en el software Ares del paquete Proteus 7, desarrollado por Labcenter Electronic's.

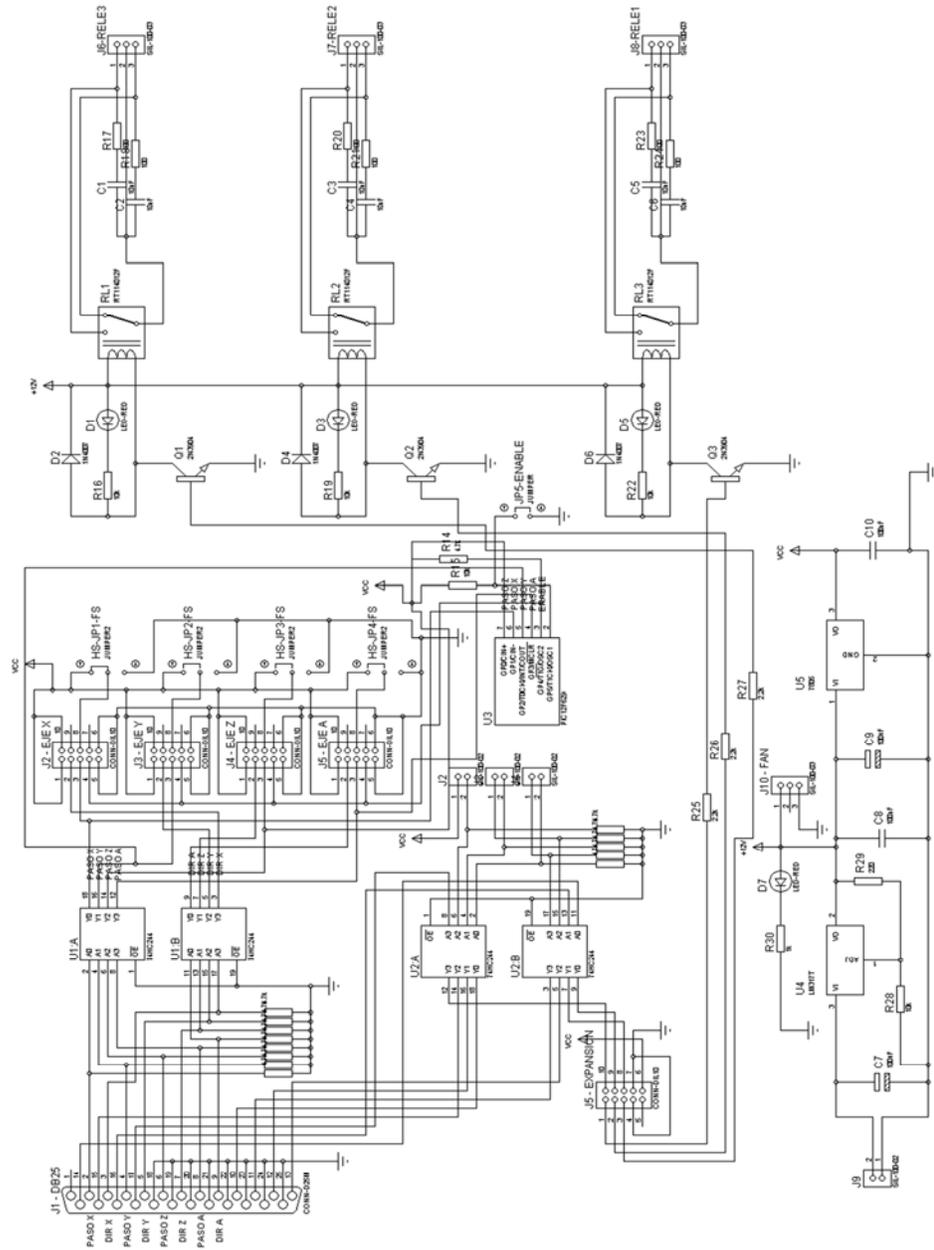
Figura 38: Simulación 3D placa interfaz.



FUENTE: Esta investigación

A continuación se muestra el diagrama esquemático realizado en el software de diseño electrónico Proteus.

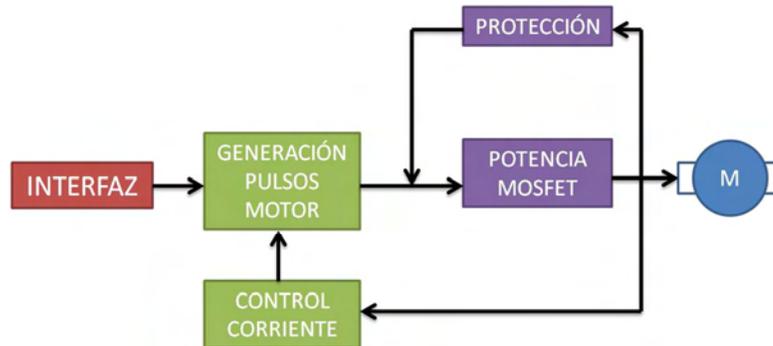
Figura 39. Diagrama esquemático interfaz PC – Máquina CNC.



FUENTE: Esta investigación

5.3 DRIVER'S MOTORES PASO A PASO

Figura 40. Diagrama de Bloques Drivers Motores.



FUENTE: Esta investigación

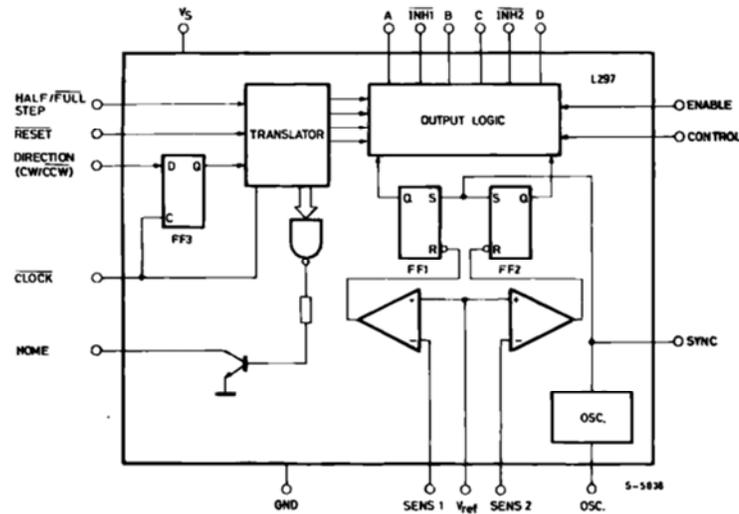
Al momento de diseñar los drivers de los motores paso a paso se plantean las siguientes premisas:

- Los motores a utilizar serán del tipo unipolar, siendo el de mayor consumo de 1,2A.
- Los drivers incluirán un bloque para controlar la corriente de alimentación de los motores.
- Los drivers serán modulares, ubicando los tres drivers en placas diferentes.
- La alimentación de los drivers será proporcionada, ya regulada, directamente desde la interfaz.

Con estas premisas se inicia determinando el integrado que será encargado de generar las secuencias de giro al motor paso a paso. Para esta función se define utilizar el integrado L297, que es un controlador para motores paso a paso tanto unipolares como bipolares. La elección de este integrado se da por varias razones:

- Puede controlar los motores paso a paso unipolares que se utilizarán en la mecánica de la máquina.
- Requiere de muy pocos componentes externos para funcionar, reduciendo así los costos del diseño.
- Posee internamente un controlador de la corriente de carga.
- Es completamente compatible con las señales enviadas por la interfaz ya diseñada.
- Puede ser configurado para funcionar en full drive, wave drive o medio paso.

Figura 41. Diagrama interno L297.



Fuente: APLICACION NOTE. En: The L297 Stepper Motor Controller. SGS-THOMSON MICROELECTRONICS. 1995. P. 6.

Debido a que el L297 a su salida es capaz de entregar un máximo de 100mA, es necesario implementar un circuito de potencia que sea capaz de entregar la corriente necesaria a los motores, pero que a la vez sea capaz de funcionar a la frecuencia de las señales que van a ser entregadas por el L297.

Se analizan diversas clases de transistores de tipo MOSFET, FET y BJT, llegando a la conclusión que los MOSFET son los que mejores prestaciones tienen frente a las otras dos familias de transistores, ya que presentan un consumo en modo estático muy bajo, son controlados por voltaje presentando una impedancia de entrada muy alta y lo que es más importante, presentan una velocidad de conmutación muy alta, del orden de los nanosegundos. Debido a todo esto se eligen para excitar las bobinas de los motores los transistores tipo MOSFET IRFZ44N. Estos transistores pueden soportar una tensión V_{DSS} de 55V y una corriente de drenaje de hasta 49A, haciéndolos perfectos para los requerimientos. Viene en encapsulado TO220, por lo que se hace necesario proveerlo de un disipador de calor cuando la potencia a disipar alcanza los 20W.

Para poder utilizar el control de corriente que incluye el L297 se agregaron compuertas AND 74HCT08AP, entre las señales que salen del L297 y las compuertas (gates) de los transistores MOSFET, de esta manera la señal PWM que regula la corriente que provee el L297 a través de las compuertas AND interrumpen las señales de disparo que van a cada MOSFET, generando de esta manera el “chopping” en las bobinas de cada motor.

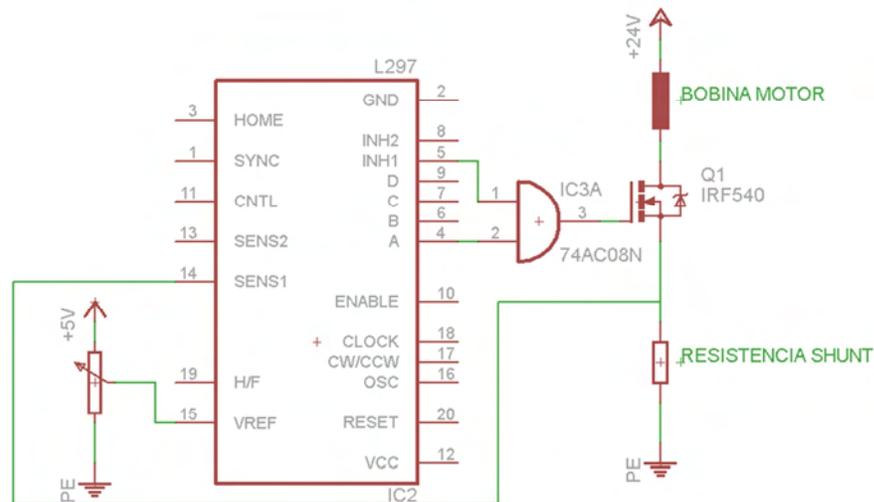
El control de corriente funciona de la siguiente manera, por medio de las resistencias “shunt”, se sensa la corriente que llega a cada bobina y según la tensión de referencia seteada por el potenciómetro, el L297 genera el chopping que

aplica sobre los MOSFET a través de las compuertas AND, de esta manera la señal de chopping va interrumpiendo las señales de activación de cada compuerta.

Para calcular la corriente a la cual debe trabajar el driver, simplemente se calcula la tensión de referencia presente en el pin 2 del potenciómetro mediante la siguiente fórmula

Luego de esto, debemos regular V_{ref} según el valor calculado, para ello con un multímetro se mide la tensión de referencia presente en el seteador y lo vamos girando hasta obtener el valor deseado

Figura 42. Detalle de control de corriente de carga.



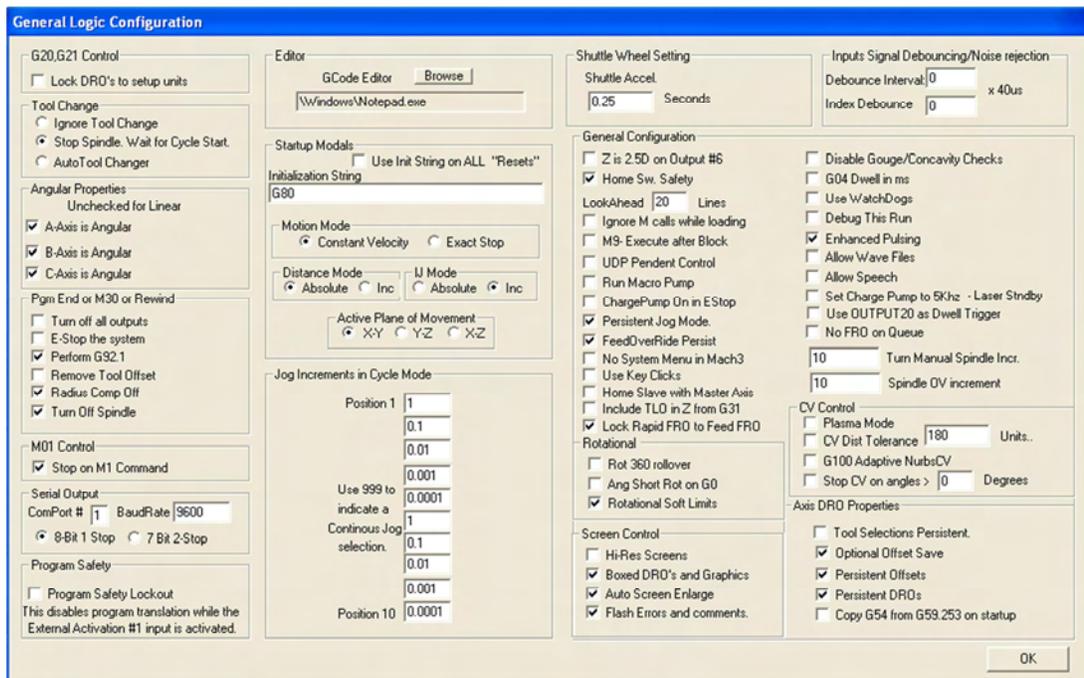
FUENTE: Esta investigación

En la siguiente figura se muestra la simulación 3D de la placa de interfaz completamente terminada, desarrollada en el software Ares del paquete Proteus 7, desarrollado por Labcenter Electronic's.

5.4 CONFIGURACION SOFTWARE

5.4.1 Mach3. Como ya se dijo, uno de los programas utilizados para posicionar la máquina es el Mach3, dado que el diseño de la interfaz va acorde con las señales que envía este programa. Este software ejecuta el código G generado después de diseñar la placa de circuito impreso.

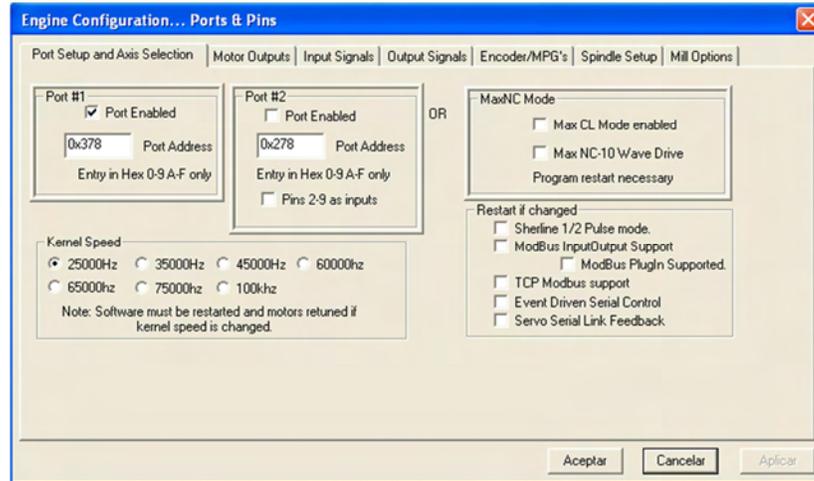
Figura 45. Configuración general Mach3.



FUENTE: Esta investigación

En la figura anterior se observa la configuración requerida para obtener el correcto funcionamiento de nuestra máquina, donde se hace necesario configurar correctamente la opción “Tool Change” marcando “Stop Spindle, wait for cycle start”, esto se hace ya que la máquina al no poseer un intercambiador automático de herramientas, debe detener la ejecución del código cuando detecte una instrucción de cambio. Activando esta opción el software al intentar ejecutar una orden de cambio dentro del código G, detiene el husillo, detiene la ejecución del código y lleva la punta de la máquina hasta el origen de coordenadas, hasta presionar nuevamente Start. En el origen es posible realizar el cambio de fresa, necesaria para proseguir con el programa. Otra opción importante a configurar en esta ventana es la de “Active Plane of Movement”, la cual seleccionaremos en X-Y, que es el plano donde se desplaza nuestro prototipo.

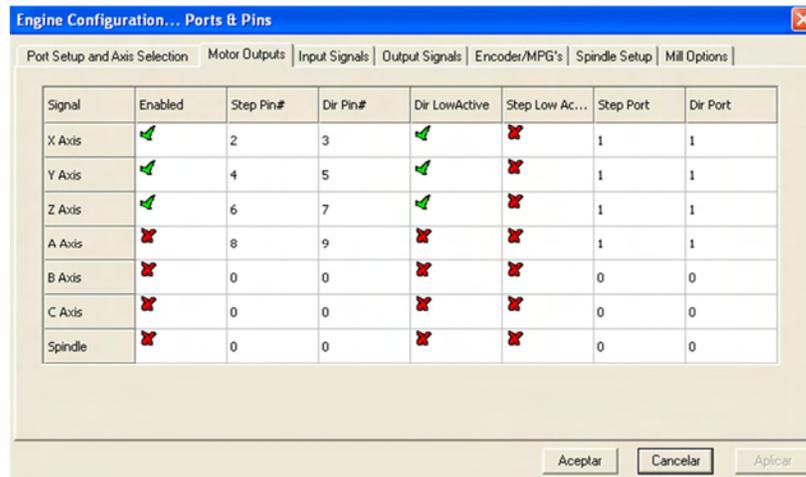
Figura 46. Configuración de puerto.



FUENTE: Esta investigación

En la ventana de configuración de puerto se hace necesario seleccionar el puerto paralelo de la impresora, que por defecto es el 0x378 y ajustar la velocidad de frecuencia de los pulsos.

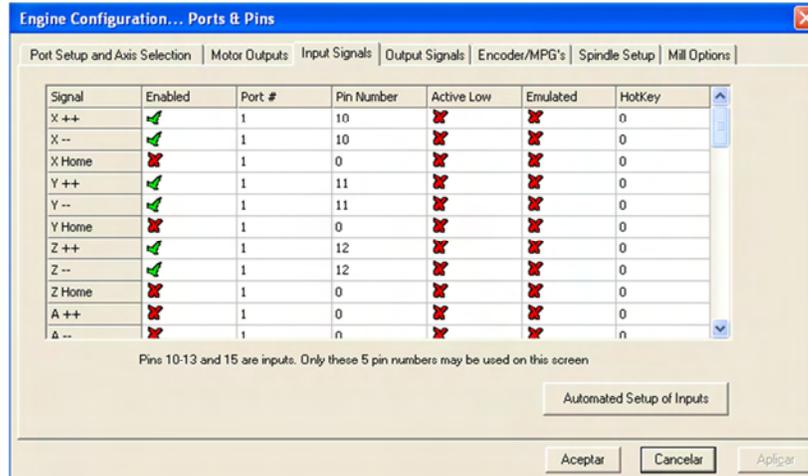
Figura 47. Configuración de salida de los motores.



FUENTE: Esta investigación

En la pantalla de configuración de salida a los motores es necesaria la correcta configuración de los pines de habilitación, numero de pin del paso, numero del pin de dirección e indicar que puerto va a comandar los motores, esto cuando se dispone de más de un puerto paralelo en la computadora.

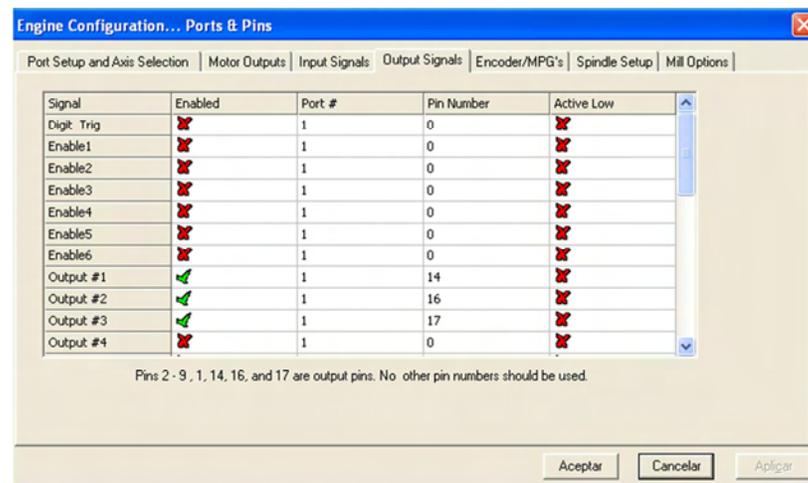
Figura 48. Configuración señales de entrada.



FUENTE: Esta investigación

En esta ventana configuraremos los pines por donde ingresarán las señales de entrada de los límites de carrera, esto se hace utilizando el registro de datos del puerto paralelo, siendo necesario configurar los limites “++” y “--” de cada uno de los tres ejes, no siendo necesaria la configuración de los “home”

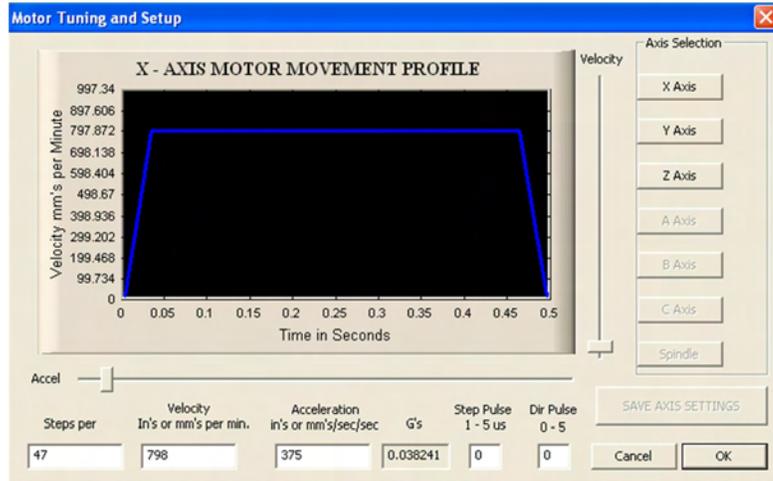
Figura 49. Configuración señales de salida.



FUENTE: Esta investigación

En esta ventana configuraremos las salidas hacia los relés, cuando conectemos en la interfaz bombas de agua, aspiradoras de viruta, etc., tal como se muestra en la figura.

Figura 50. Configuración tuneado de motores.



FUENTE: Esta investigación

En la ventana de configuración del tuneado es necesario conocer el desplazamiento que realizará cada eje por cada pulso enviado, para esto calcularemos la relación de transmisión utilizando la siguiente fórmula:

— —

Donde

- i =relación de transmisión
- n_1 =numero de dientes piñón motor (15)
- n_2 =numero de dientes segundo piñón (60)
- n_3 =numero de dientes tercer piñón (15)
- n_4 =numero de dientes piñón de salida (75)

Para los moto reductores utilizados tenemos que $i=20:1$

Para calcular los pulsos necesarios para desplazar el eje 1mm, tenemos la siguiente expresión

—————

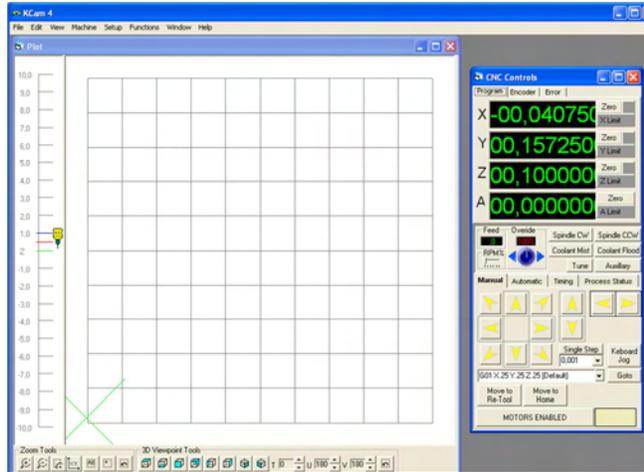
Donde

- P_{total} =Pulsos totales.
- D_{total} =Distancia total del movimiento
- i =Razón de la reducción
- d_{carga} =Distancia que se mueve la carga por rotación del eje del piñón de salida
- \square_{paso} =Resolución de paso del motor

Para nuestro prototipo este valor es de 470 pulsos, para los ejes X y Y, ya que tienen el motorreductor y para el eje Z es de 21, ya que el motor se encuentra unido directamente a la correa de transmisión.

5.4.2 Kcam4

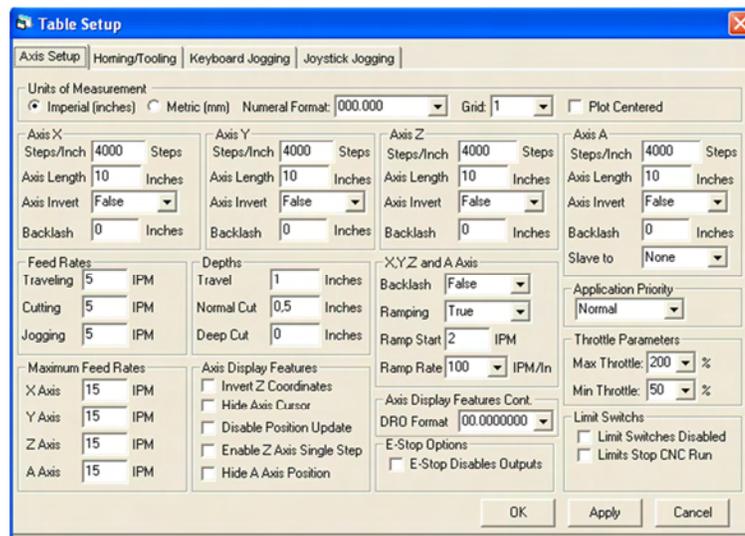
Figura 51. Ventana de bienvenida KCam4.



FUENTE: Esta investigación

Otro de los programas utilizados para el correcto funcionamiento de la máquina, ya que las señales son similares a las del Mach3. Para su correcta configuración se tienen varias opciones que detallaremos enseguida.

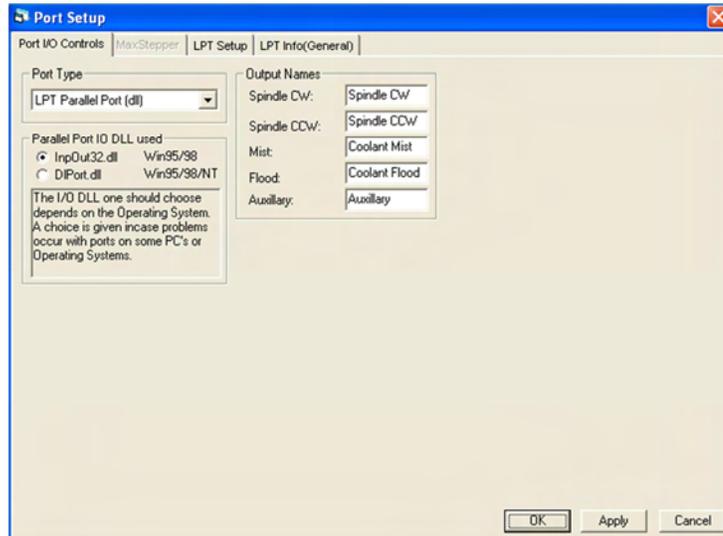
Figura 52. Configuración de ejes.



FUENTE: Esta investigación

Al igual que en Mach3, en la configuración de ejes es necesario especificar la cantidad de pasos necesarios para avanzar una unidad, ya sea milímetros o pulgadas. De igual forma en esta ventana vamos a poder configurar la máxima velocidad de desplazamiento de cada uno de los ejes.

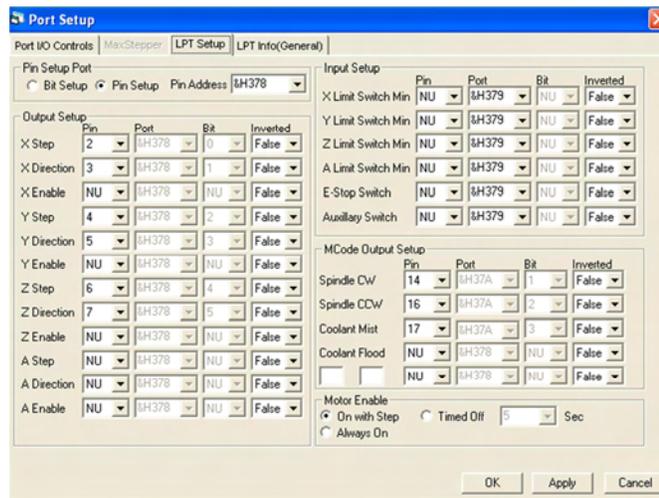
Figura 53. Configuración de puertos.



FUENTE: Esta investigación

El puerto utilizado es el puerto paralelo, si se disponen de dos puerto KCam4 nos pedirá que especifiquemos por cual enviará las señales de control. De igual forma nos pide que indiquemos que librería utilizará para el control del puerto, en nuestro caso la de mejor funcionamiento fue InpOut32.dll.

Figura 54. Configuración de salidas.

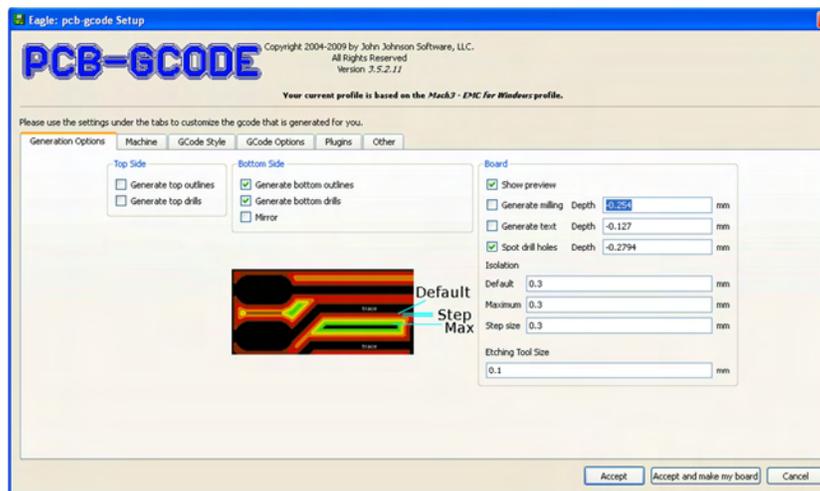


FUENTE: Esta investigación

Es necesario configurar las salidas tal como se muestran en la figura para un correcto funcionamiento de la máquina.

5.4.3 Pcbgcode. La ULP, pcb-gcode-3.3.2 es una aplicación creada con el lenguaje de programación propio del software de diseño electrónico Eagle. Con esta ULP traduciremos el esquema diseñado en Eagle, con todos los componentes, pistas y agujeros listos, al código G. En esta ULP es necesario ajustar algunas opciones, como profundidad de fresado, profundidad de taladrado, nivel de precisión, etc.

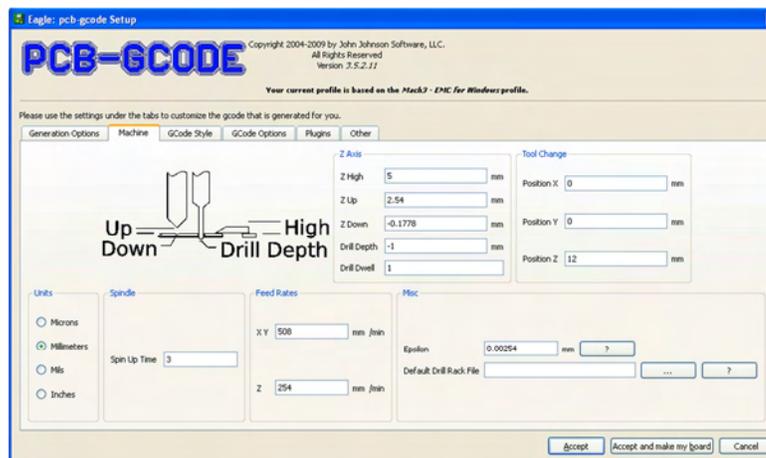
Figura 55. Configuración general ULP.



FUENTE: Esta investigación

En esta ventana configuraremos la profundidad de fresado y cuantas veces la máquina “repintará” la misma línea.

Figura 56. Configuración de máquina.



FUENTE: Esta investigación

En esta ventana le indicaremos a la máquina cual es el grosor de la fresa a utilizar, las unidades de medida, la posición donde debe ubicarse para realizar el cambio de herramienta.

6 PRUEBAS

Las pruebas individuales de cada módulo se realizan durante el diseño y desarrollo de cada uno, en este capítulo se describen de manera general las que se consideran fundamentales en la toma de decisiones. La prueba final, con todos los módulos integrados, se realiza fresando y perforando una placa de circuito impreso. Con las pruebas lo que se busca en primer lugar es verificar el correcto funcionamiento de todas las partes que componen el sistema y en segundo lugar realizar un mecanizado completo de una placa de circuito impreso. En el sistema mecánico se busca reducir al máximo posibles vibraciones indeseables, calibración y ortogonalidad de los ejes, correcto funcionamiento de los sensores finales de carrera, así como un movimiento suave y preciso de todas las partes móviles que componen la máquina. En el sistema electrónico se busca la posible pérdida de pasos y controlar el consumo de corriente de los motores paso a paso para evitar daños en sus bobinas, así como controlar la disipación de calor por parte de los MOSFET de potencia. En el software se requiere determinar si la configuración realizada corresponde a los requerimientos de la máquina, por ejemplo, si al enviar un desplazamiento positivo al eje X, es efectivamente este eje quien realiza el movimiento en la dirección correcta. También se busca si al activarse cualquiera de los seis sensores finales de carrera dispuestos a lo largo y ancho de los tres ejes, la máquina detiene su funcionamiento y así evitar daños tanto en los módulos mecánicos como electrónicos.

La correcta calibración del prototipo permitirá obtener una mayor calidad final del trabajo al momento de mecanizar las placas.

6.1 PRUEBAS DE COMUNICACIÓN SOFTWARE MACH3 Y KCAM: Para observar las señales enviadas por el software de control numérico, tanto MACH3 como KCAM, se realizan pruebas de comunicación entre estos programas y un osciloscopio, específicamente para diseñar el modulo de la interfaz del prototipo de maquina CNC. Para este proceso en primer lugar fue necesario estudiar en profundidad los programas mencionados, para de esta manera configurar adecuadamente sus salidas hacia el puerto paralelo. De esta forma se determina que en ambos casos se utilizan un pin del puerto paralelo para controlar la velocidad de desplazamiento y otro pin para controlar el sentido de giro del mismo, siendo necesario configurar para cada eje los pines que controlarán su velocidad y sentido de giro. Se realiza un análisis para determinar que pines dirigirán cada eje y de esta forma se construye un cable que comunica el puerto paralelo con la interfaz.

6.2 PRUEBAS DE INTERFAZ: Para realizar la prueba de correcta transmisión de los datos desde el puerto paralelo a los driver de control de los motores a través de la interfaz, se toman muestras de los datos ingresados a la misma y se comparan con los datos a la salida. Esto se hace usando un osciloscopio

utilizando los dos canales con los que dispone. Ambas imágenes se muestran al tiempo y se superponen sobre la pantalla del osciloscopio. Se envían señales repetitivas por todos los pines del puerto paralelo y en todos los casos las imágenes tanto para el CH1 como para el CH2 son idénticas, verificando de esta forma que la interfaz transfiere todos los datos y no existe ninguna pérdida de bits mientras se realiza la transmisión. Durante las pruebas de funcionamiento de la interfaz, también se realizan pruebas para verificar el correcto funcionamiento de los relés auxiliares, siendo activados y desactivados correctamente cada vez que se enviaba la señal correspondiente.

6.3 PRUEBA DE DRIVER'S DE MOTORES: Se verifica inicialmente el buen estado de los motores, midiendo la resistencia en sus terminales de conexión para descartar la existencia de cortos circuitos o ausencia de conducción eléctrica en sus bobinas. Esto se hace necesario, puesto que los motores en su totalidad son reciclados. Para los motores de los ejes X y Y, los valores medidos en promedio para las tres bobinas son 197Ω y 141Ω respectivamente, lo cual corresponde con las hojas de datos de los motores. Se repite el mismo procedimiento para el motor del eje Z, el cual según el fabricante debe tener una resistencia 30Ω y al momento de medir se obtiene 28Ω , que en la práctica es un valor bajo y por tanto aceptable. Cada driver se prueba independientemente con su respectivo motor y se calibra el valor máximo de corriente que ha de circular por las bobinas del mismo, siendo este valor diferente para cada motor. Se realizan pruebas de la máxima velocidad de giro de cada motor antes de comenzar a perder pasos o comenzar a girar erróneamente, siendo estos datos registrados en las figuras de configuración de software en el capítulo 5. También durante estas pruebas se realiza un seguimiento de la temperatura alcanzada por los MOSFET, observando que estos en ningún momento sufrieron calentamiento alguno, aún ofreciendo resistencia sobre el rotor del motor sujetándolo con un trapo seco, por lo que se decide que no es necesario la instalación de un disipador de calor.

6.4 PRUEBAS CONJUNTAS: Estas pruebas buscan determinar el correcto funcionamiento y armado de todos los módulos activados a la vez. Para estas pruebas se sustituye el mototool por un micropunta y la pruebas se realizan sobre una hoja de papel bond. La primera prueba realizada, busca determinar si el recorrido de los ejes X y Y es ortogonal entre sí, para ello se envía a la máquina la instrucción de dibujar tres cuadrados idénticos distribuidos en forma diagonal, luego con un transportador se miden los 12 ángulos internos de los cuadrados y en todos los casos la medida fue de 90° . Para calibrar la distancia recorrida por cada impulso enviado a cada eje, se envían las ordenes de dibujar dos reglas de diez centímetros de largo, una a lo largo del eje X y la otra a lo largo del eje Y. Luego con una regla se miden los dibujos y se encuentra que las medidas para ambos ejes son de 12,3 centímetros, por lo que se hace necesario ajustar en el software la distancia recorrida por el número de pasos, realizado el ajuste, se repite la prueba obteniendo esta vez 10 centímetros para ambos ejes.

Luego de haber calibrado y afinado la máquina se realizan pruebas sobre placas de baquelita vírgenes, ya con el mototool instalado, buscando obtener la velocidad de rotación del husillo que mejor desempeño presente y la velocidad optima de desplazamiento de cada eje. Para el husillo se encuentra mediante observación directa, que su desempeño es mayor a altas revoluciones, por lo que el mototool se configura a 35.000 rpm. La velocidad de desplazamiento de los ejes se debe calibrar ya que al aumentar la misma, el torque en los motores disminuye por lo que se puede presentar perdidas de paso en los ejes. De esta manera y luego de realizar varias ensayos, se determina como valor seguro de desplazamiento para todos los ejes durante la fase de fresado del 10% de la velocidad de desplazamiento cuando la punta del husillo se encuentra elevada sin tocar la baquelita.

7 ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL SISTEMA

El prototipo de máquina CNC contiene las especificaciones técnicas mostradas en la siguiente tabla.

Tabla 12. Especificaciones técnicas.

MODULO MECANICO	
Recorrido máximo eje X	33,5cm
Recorrido máximo eje Y	30,5cm
Recorrido máximo eje Z	26cm
Volumen de trabajo	1098cm ³
Reducción velocidad caja eje X	20:1
Reducción velocidad caja eje Y	20:1
Reducción velocidad caja eje Z	Sin caja reductora
Tipo de caja reductora	Engranajes de dientes rectos
Tipo de transmisión ejes X, Y	Tren de engranajes y correa dentada
Tipo de transmisión eje Z	Correa dentada
Peso total	6,2kg
MODULO ELECTRONICO	
Transmisión de datos	Puerto paralelo, transmisión bidireccional
Corriente nominal de manejo de driver	10A
Consumo potencia aproximado total sin carga	1,5W
Consumo potencia aproximado total con carga	48,4W
Alimentación motores	22V DC
Alimentación interfaz	22V DC
Alimentación driver	5V DC
Alimentación fuente	110V AC, 60Hz
DIMENSIONES	
Alto total	53cm
Ancho total	44,5cm
Largo total	54cm
Interfaz	Alto: 9,5cm Largo: 16,5cm
Driver	Alto: 11cm Largo: 6,5cm
SOFTWARE	
Requerimientos hardware	Windows XP. Puerto paralelo.

Requerimientos software	Mach3, Kcam, Eagle PCB Design, ULP PCBgcode
MOTOTOOL	
Velocidad sin carga	15.000rpm – 35.000rpm
Alimentación	110V AC, 60Hz
Potencia	135W
Características Interfaz	Indicador visual de encendido Indicador visual de transmisión de datos Selector de paso, medio paso 4 ejes de control 3 conectores para instrumentos adicionales
Características driver	Indicador visual de home Selector de control de corriente
Características motor eje X	Alimentación: 6V Torque mantenimiento: 34,3mNm Grados por paso: 1,8° Pasos por vuelta: 200 Resistencia bobinas: 200Ω
Características motor eje Y	Alimentación: 6V Torque mantenimiento: 34,3mNm Grados por paso: 1,8° Pasos por vuelta: 200 Resistencia bobinas: 140Ω
Características motor eje Z	Alimentación: 24V Torque mantenimiento: 230mNm Grados por paso: 7,5° Pasos por vuelta: 48 Resistencia bobinas: 30Ω

FUENTE: Esta investigación.

8 CONCLUSIONES

El desarrollo del objetivo principal del presente trabajo se alcanzó en su totalidad, diseñando un sistema capaz de fresar y perforar placas de circuito impreso, que realiza la tarea en un tiempo menor al utilizado al fabricar PCB por métodos artesanales y con una calidad final mayor.

En cuanto a los objetivos específicos estos se alcanzaron en su totalidad. Se construyó el prototipo de máquina CNC con materiales de bajo costo, reciclando en su mayoría todos los componentes mecánicos, los componentes electrónicos son de fácil adquisición en la región. La programación de la máquina se realizó utilizando la ULP pcb-gcode del programa Eagle, con lo cual se pudo fresar y perforar las placas desde dos programas ejecutores de código G, como son Mach3 y KCam4.

Las capacidades y desempeño del sistema, en el caso de presentarse futuros prototipos, deben enfocarse a la comercialización, ya que la investigación base del método de fresado y perforado de placas mediante control numérico computarizado ya se desarrollaron en este trabajo, por lo tanto se debe incluir la eficiencia como un parámetro indispensable, ya que el sistema para poder ser competitivo en la industria, debe ser lo más rápido y exacto posible.

El sistema en su totalidad tiene una alta escalabilidad, siendo compatible con varios software CNC sin realizar cambio alguno en el control electrónico o en la parte mecánica, esto ayudado por la modularidad del sistema, que permite realizar cambios o reparaciones de la máquina, sin tener que rehacer todo desde cero.

Se destaca la importancia que al terminar el proyecto, se tiene el prototipo de una máquina CNC completamente funcional, innovadora a nivel regional, que utilizando tecnología propia del sector, cuenta con una alta efectividad en el fresado y perforado de placas de circuito impreso.

Con el auge de desarrollo de la ingeniería electrónica en la región, impulsado notablemente por la creación del programa en la Universidad de Nariño, se demuestra que es posible automatizar procesos industriales en distintos campos de acción.

A través del desarrollo del presente trabajo y mediante relaciones laborales y/o comerciales referentes a la materia, se destaca que es posible desarrollar proyectos de automatización en la región, que estén a la altura de otros lugares o instituciones con experiencia en el área.

El costo aproximado del trabajo, exceptuando la mano de obra, es de doscientos sesenta y un mil pesos m/cte (\$261.000), los cuales fueron asumidos en su totalidad por el autor del proyecto. Es evidente que la inversión es baja, pero esta sube al desarrollar una máquina fresadora/perforadora con mayores prestaciones, a pesar que el prototipo es completamente funcional.

9 RECOMENDACIONES

El trabajo de investigación desarrollado sirve como base para posteriores trabajos en el campo del control numérico y mecanizado de piezas. Dentro de estos campos confluyen muchas ramas de la ciencia, como son la ingeniería electrónica, mecánica y sistemas. Se recomienda para trabajos futuros organizar un equipo multidisciplinario para obtener mayores prestaciones.

La resolución del sistema depende en gran medida de la resolución de la parte mecánica, debido a que los sistemas de transmisión poseen una exactitud inherente. Sin embargo hay sistemas de transmisión en los cuales es posible alcanzar resoluciones elevadas, como es el caso de tornillos con bolas recirculantes. Por este motivo se recomienda utilizar mecanismos con niveles de exactitud mucho mayores para obtener mejores resultados en la mecanización de placas.

La utilización de fresas de calidad media, permiten obtener placas con una calidad final aceptable. Por esta razón se recomienda, para obtener placas con un terminado final de gran calidad, la adquisición de fresas con una alta fuerza específica de corte, como lo son las fresas de acero cementado, que poseen un valor de corte de 2.900N/mm^2 .

BIBLIOGRAFIA

APUNTES DE INGENIERIA MECANICA. Portal para investigadores y profesionales. Colombia. Citado el 8 de febrero de 2012 de <http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_mecanica/controlnumericocnc/default.asp>

AUTOMATION DIRECT. Catalogo en línea. Canadá. Marzo de 2007. [citado el 19 de agosto de 2011]. <<http://www.automationdirect.com/static/manuals/surestepmanualsp/appxa.pdf>>

CASTELL, Esteban Federico. Proyectos. Córdoba (Argentina). Julio de 2003 [citado el 19 de agosto de 2011]. <<http://www.esteca55.com.ar/Proye-CNC2-01.html>>

CONTROL DE UN MOTOR PASO A PASO: PIC, USB, C#. Navarra (España). Universidad de Navarra. 2006. 47p.

CORREA, Julio Alberto. Control Numérico Computarizado. Rosario (Argentina). Escuela Técnica Nuestra Señora del Rosario. 1997. 12p.

CORREA, Julio Alberto. Inicio en control numérico computarizado [en línea]. Rosario (Argentina). Marzo de 1997 [citado el 16 de Noviembre de 2011]. de <<http://juliocorrea.wordpress.com/2007/08/17/iniciacion-en-control-numeric-computarizado/>>

CRUZ, Francisco. Control numérico y programación: Sistemas de fabricación de máquinas automatizadas. Editorial Marcombo. 400p.

CSTEP HOBBY CNC. Italia. Octubre de 2008 [citado el 12 de Noviembre de 2011]. Disponible en internet. <<http://cstep.luberth.com/>>

CUERVO, Benedicto. Energías Alternativas, automatización y robótica. México. 2006. 189p

ENRIQUEZ, Alberto. El ABC del control electrónico de las máquinas eléctricas. México. Editorial Limusa. 2002. 404p.

ESCALONA, Iván. Introducción al control numérico computarizado (CNC). México. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería, Ciencias Sociales y Administrativas. 2011. 155p.

GROOVER, Mikell. Fundamentos de Manufactura Moderna. México. Editorial Prentice Hall. 1063p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION (ICONTEC). Documentación. Presentación de Tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Quinta actualización. Bogotá. 112p

KALPAKJIAN, Serope. Manufactura, Ingeniería y tecnología. México. Editorial Pearson Educación. 1176p. Cuarta edición.

L297 DATASHEET [Online]. National semiconductor 2004. Disponible en internet <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet2/c/0g0gh362kxwx30o7xi4x2i4jzffy.pdf>

MALONEY, Timothy. Electrónica industrial moderna. Editorial Prentice Hall. 1000p. 5ª edición.

PORTAHERRAMIENTAS, CONSEJOS GENERALES DE LOS PORTAHERRAMIENTAS. Dormer. Octubre 2005 [citado el 14 de febrero de 2012]

<[http://www.dormertools.com/sandvik/2531/Dutch/s004444.nsf/Alldocs/Product*2DMachiningSolutions*2DPDF*2ATH*2DPDFes/\\$file/10Portaherramientas.pdf](http://www.dormertools.com/sandvik/2531/Dutch/s004444.nsf/Alldocs/Product*2DMachiningSolutions*2DPDF*2ATH*2DPDFes/$file/10Portaherramientas.pdf)>

QUÉ ES LA AUTOMATIZACIÓN. Quiminet, información y negocios segundo a segundo. Febrero 2008 [citado el 23 de enero de 2012] <<http://www.quiminet.com/articulos/que-es-la-automatizacion-27058.htm>>

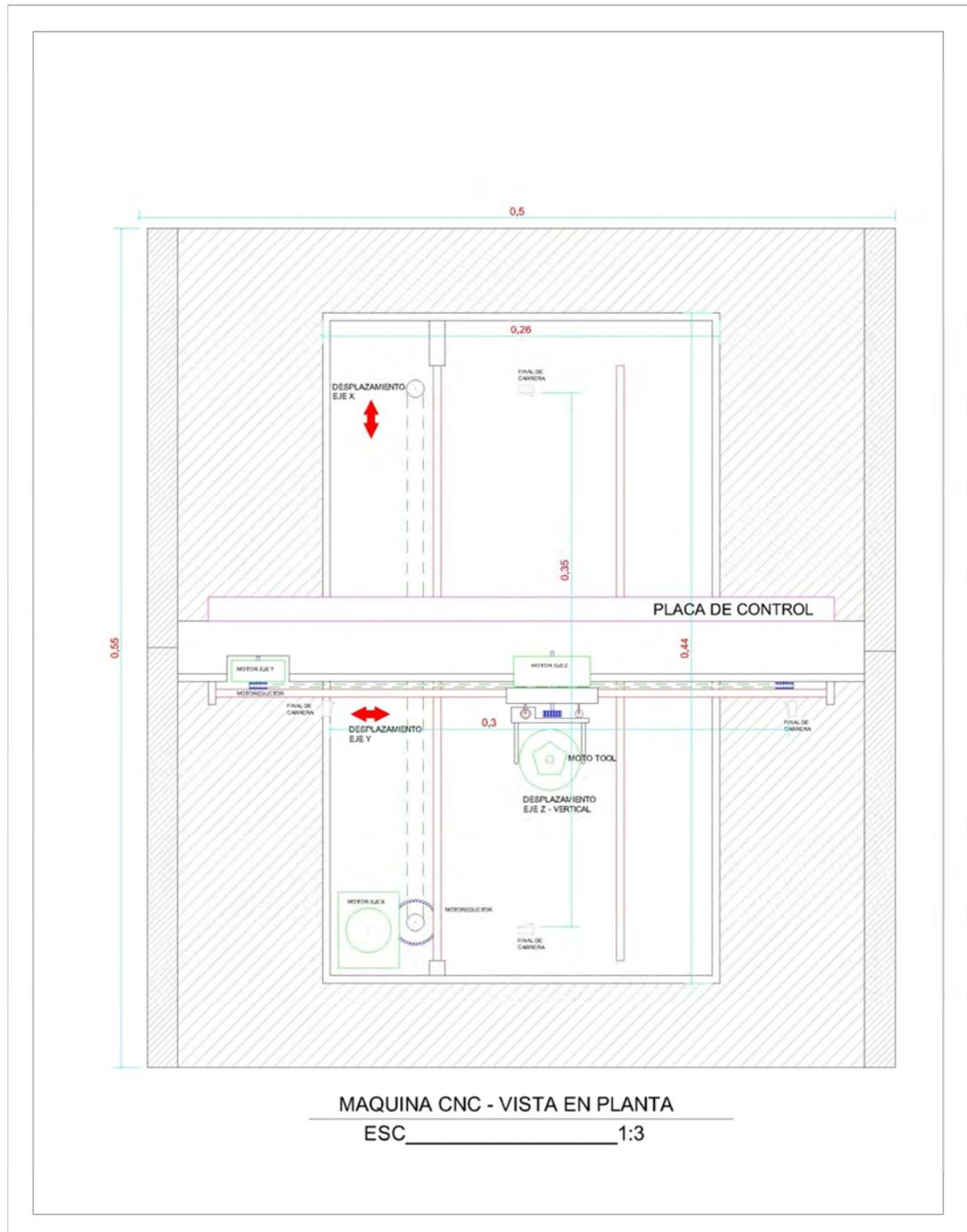
R, Luis. CNC - Control Numérico Computarizado – Introducción. Jujuy (Argentina). Agosto de 2007 [citado el 17 de septiembre de 2011]. <<http://r-luis.xbot.es/cnc/index.html>>

SANCHIS, Enrique. Sistemas electrónicos digitales: fundamentos y diseño de aplicaciones. Editorial Universidad de Valencia. 510p.

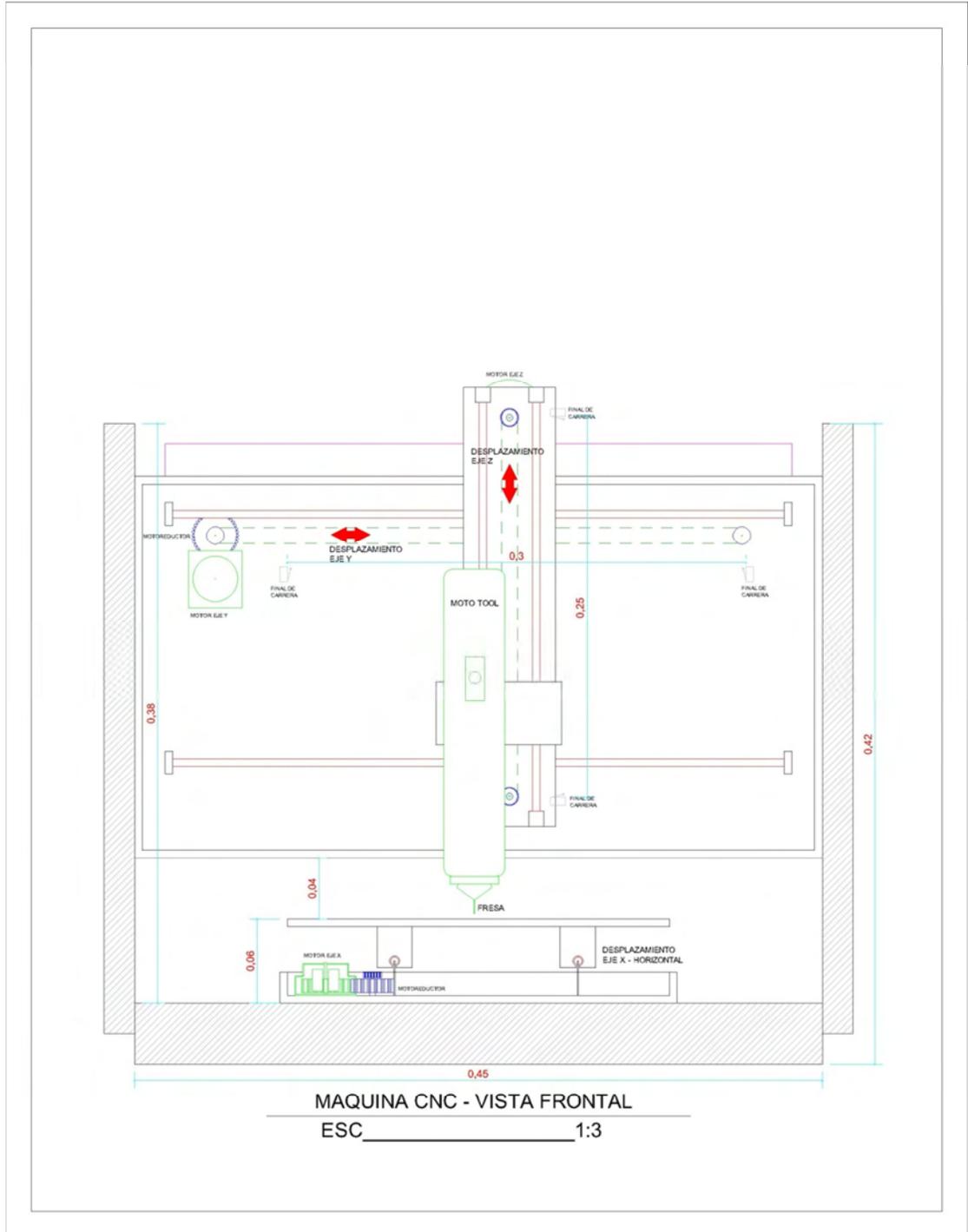
TUTORIAL SOBRE MOTORES PASO A PASO. TodoRobot. Mayo de 2010 [citado el 14 de febrero de 2012] de <<http://www.todorobot.com.ar/informacion/tutorial%20stepper/stepper-tutorial.htm>>

SANS, Jordi. Aplicaciones de control numérico para fresadoras. Editorial UPC. 194p.

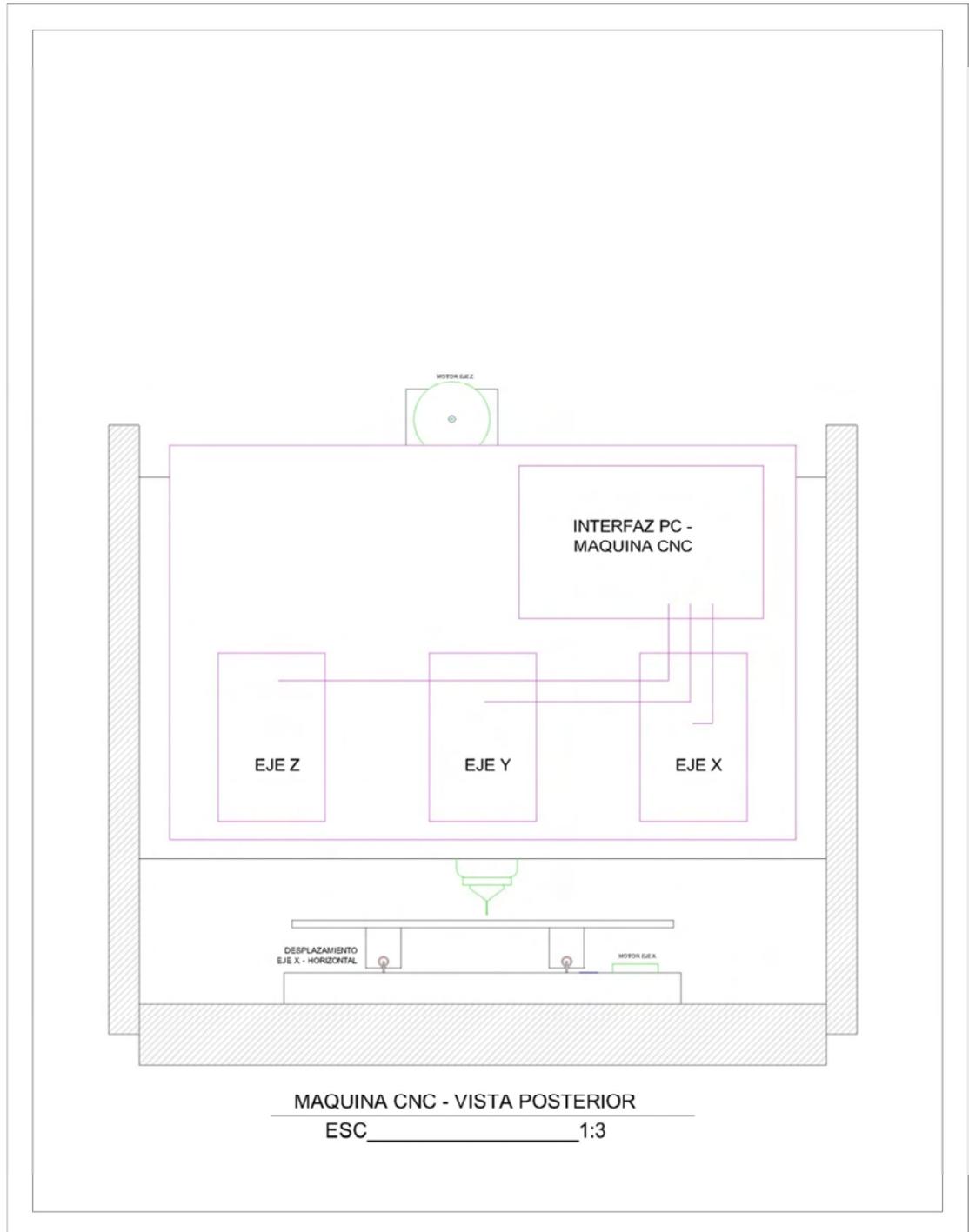
ANEXO A PLANIMETRIA VISTA EN PLANTA



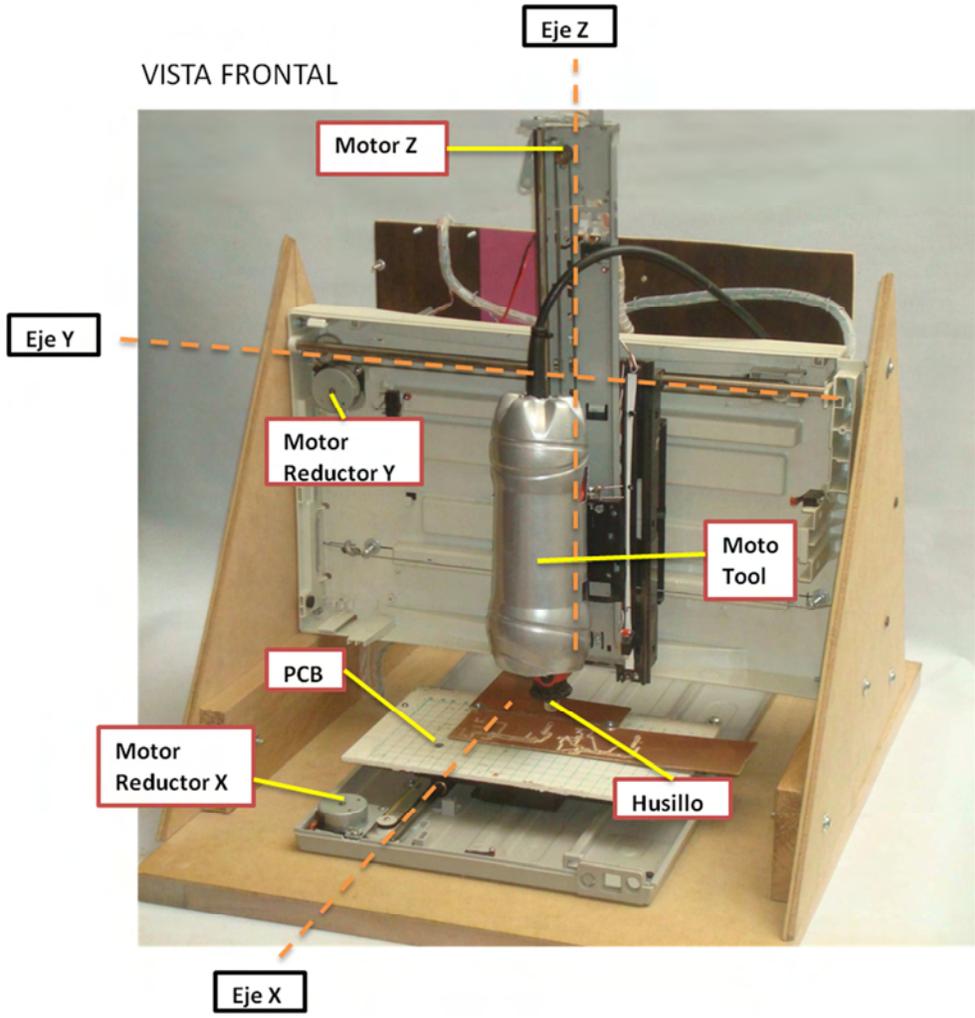
ANEXO B PLANIMETRIA VISTA FRONTAL



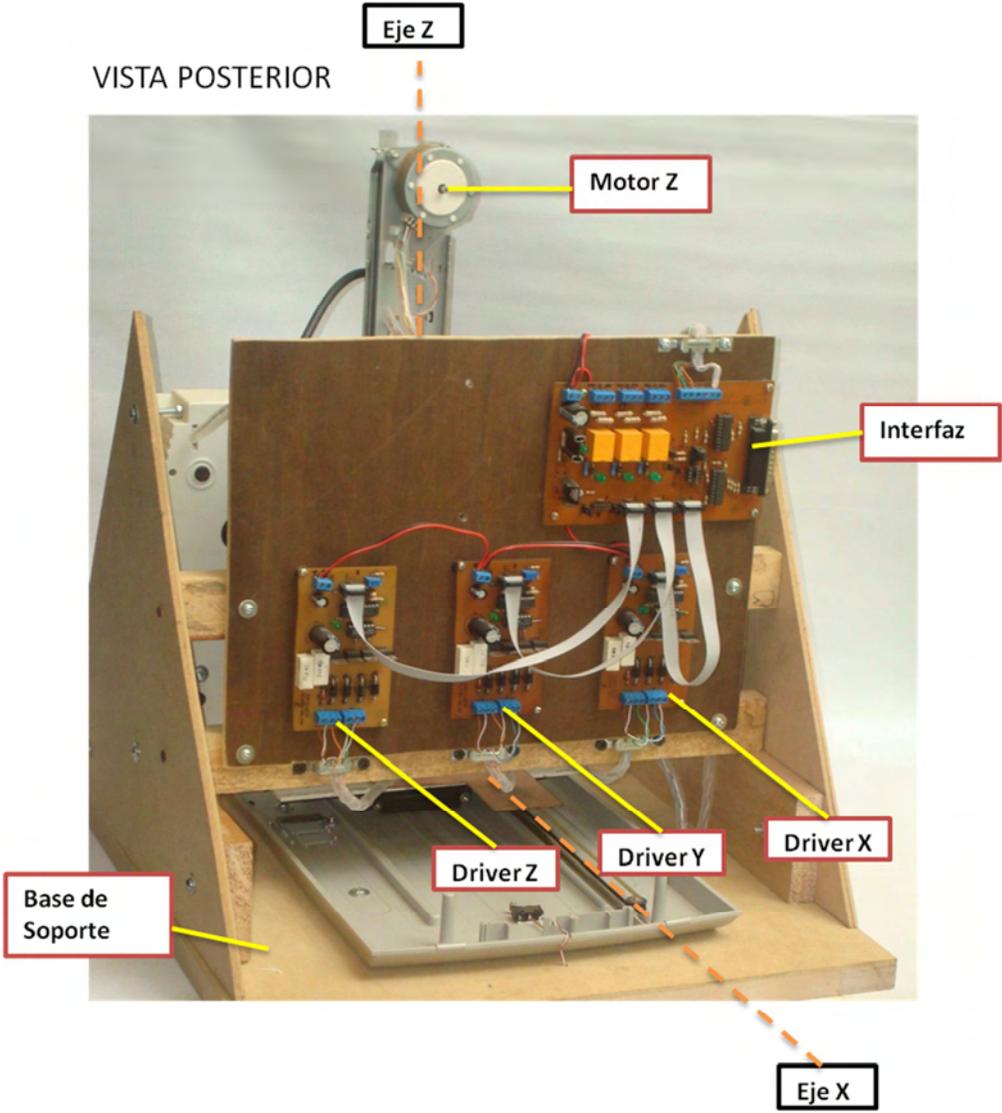
ANEXO C PLANIMETRIA VISTA POSTERIOR



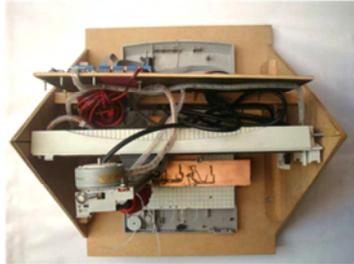
**ANEXO D
PERSPECTIVA VISTA FRONTAL**



ANEXO E
PERSPECTIVA VISTA POSTERIOR



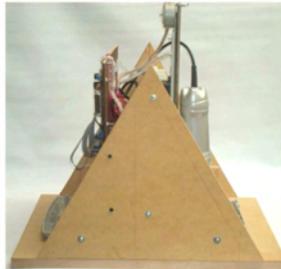
ANEXO F VISTAS CARTESIANAS



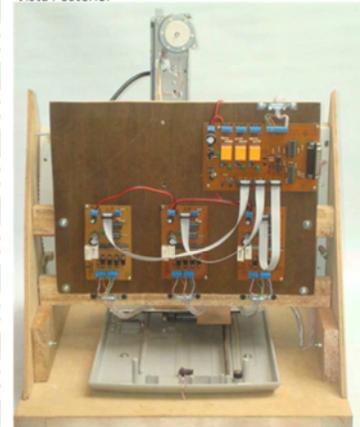
Vista en Planta
Vista Frontal



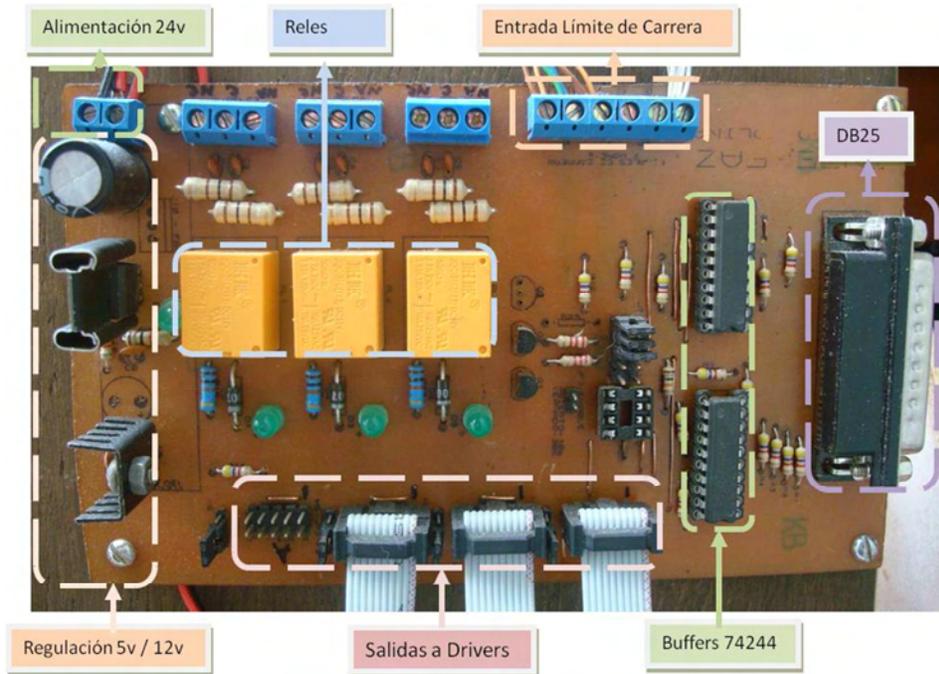
Vista Lateral



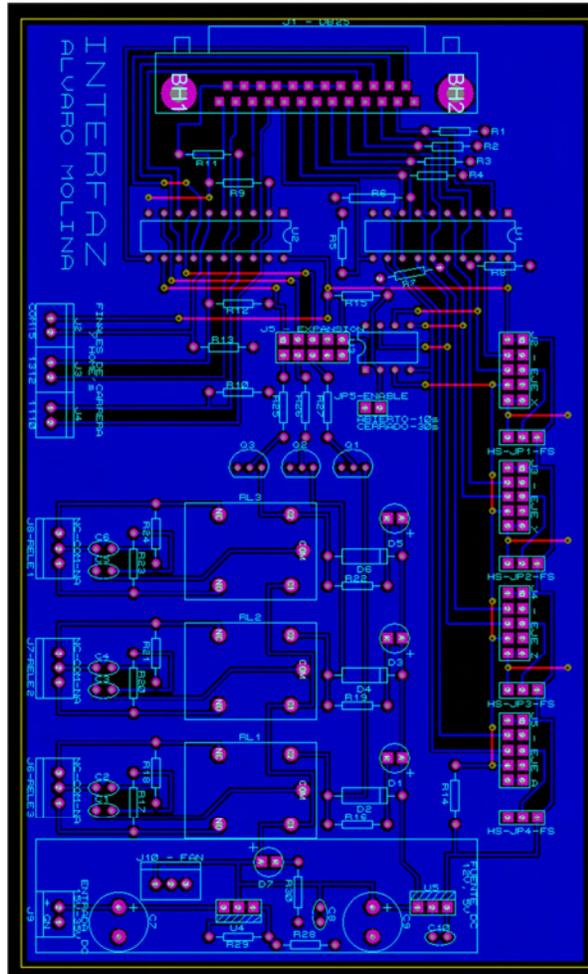
Vista Posterior



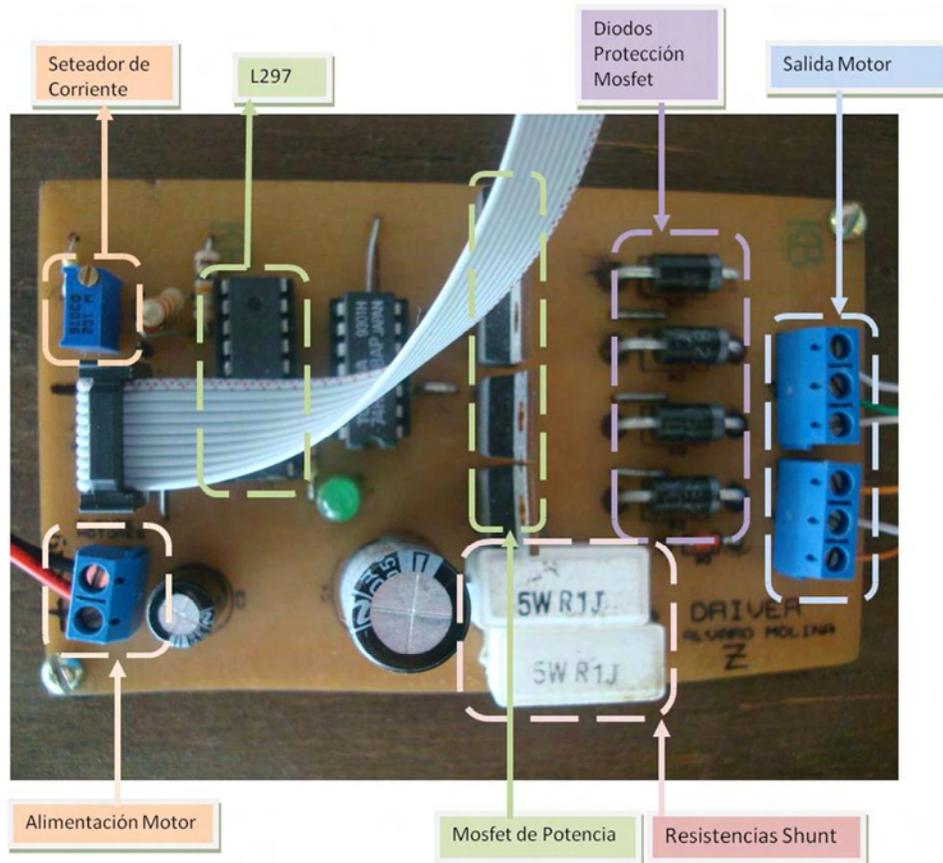
ANEXO G PLACA TERMINADA INTERFAZ



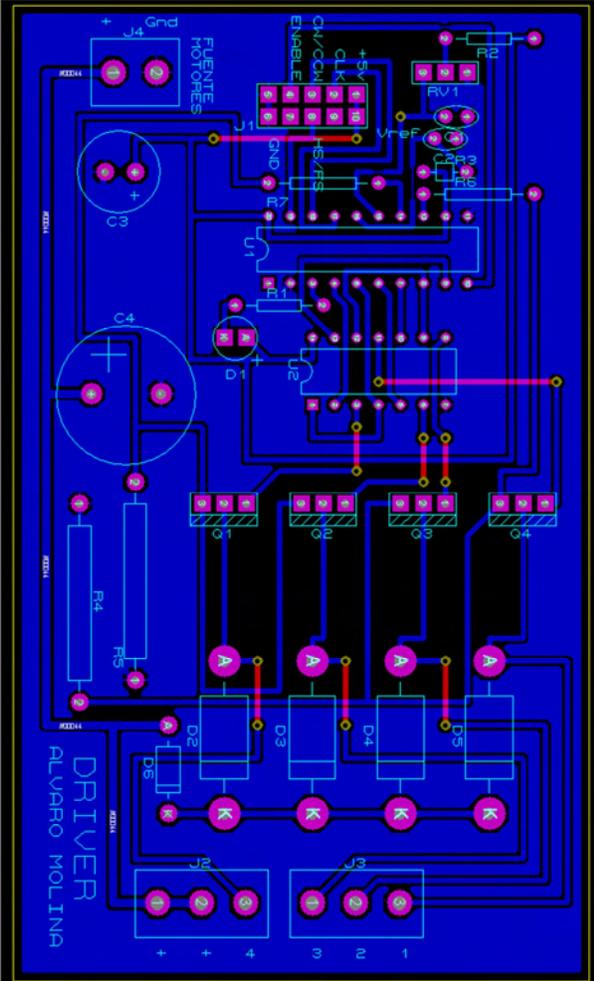
ANEXO H DISEÑO PCB INTERFAZ



ANEXO I PLACA TERMINADA DRIVER



**ANEXO J
DISEÑO PCB DRIVER**



**ANEXO K
VISTAS DE DETALLE**



PCB, Husillo, Eje X, Motor Eje X, Reductor



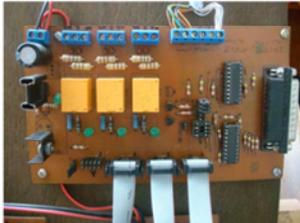
Motor Eje Y, Eje Y, Final de Carrera Y



Motor Eje Z



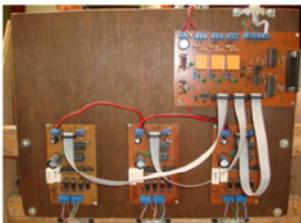
Motor Eje X, Reductor, Banda , Eje X



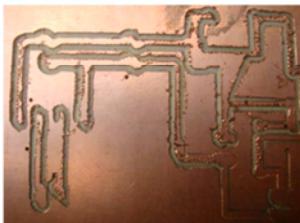
Interfaz



Eje X, Drivers



Control: Interfaz, Drivers



Placa Impresa. Baquelita



Eje Z, Moto Tool