UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

EXTENSIÓN LA MANÁ

CARRERA DE ELECTROMECÁNICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

"IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN INTEGRAL PARA LA FABRICACIÓN Y ENSAMBLAJE DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO EN LA UTC EXTENSIÓN LA MANÁ"

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniería en Electromecánica

Autores:

Robles Yasacama Johao David

Salvatierra Tacle Anderson Leonardo

Tutor:

MSc. Paco Jovanni Vásquez Carrera

LA MANÁ-ECUADOR
AGOSTO-2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Robles Yasacama Johao David, con cédula de ciudadanía No. 1729165397, Salvatierra Tacle Anderson Leonardo, con cédula de ciudadanía No. 0940536436 declaramos ser autores del presente **PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: "IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN INTEGRAL PARA LA FABRICACIÓN Y ENSAMBLAJE DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO EN LA UTC EXTENSIÓN LA MANÁ"**, siendo el MSc. Paco Jovanni Vásquez Carrera. Tutor del presente trabajo; y, eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná, y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

La Maná, 18 agosto del 2026

.



Robles Yasacama Johao David
C.C: 1729165397

Salvatierra A.

Salvatierra Tacle Anderson Leonardo
C.C: 0940536436

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación sobre el título:

"IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN INTEGRAL PARA LA FABRICACIÓN Y ENSAMBLAJE DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO EN LA UTC EXTENSIÓN LA MANÁ", de Robles Yasacama Johao David; Salvatierra Tacle Anderson Leonardo, de la carrera de Electromecánica, considero que dicho Informe Investigativo es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas técnicas, traducción y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

La Maná, 19 agosto del 2026

Ing. MSc. Paco Jovanni Vásquez Carrera
C.C.: 0501758767
TUTOR

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación, de conformidad con las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná, Carrera de Ingeniería Electromecánica; por cuanto, los postulantes: Robles Yasacama Johao David y Salvatierra Tacle Anderson Leonardo, con el título del Proyecto de Investigación: **"IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN INTEGRAL PARA LA FABRICACIÓN Y ENSAMBLAJE DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO EN LA UTC EXTENSIÓN LA MANÁ"**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

La Maná, 19 de agosto del 2026

Para constancia firman:

MSc. Corrales Bonilla Johnatan Israel
C.C: 0503145518
LECTOR 1 (PRESIDENTE)

MSc. Pazuña Naranjo William Paul
C.C: 0503338592
LECTOR 2 (MIEMBRO)

MSc. Borja Borja Cristian Darwin
C.C: 1719252585
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

Al culminar esta importante etapa de nuestra formación académica, expresamos nuestro sincero agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná, por brindarnos la oportunidad de formarnos profesionalmente en la Carrera de Ingeniería Electromecánica y por proporcionarnos los conocimientos y recursos necesarios para el desarrollo de este proyecto.

De manera especial, agradecemos a nuestro tutor, MSc. Paco Jovanni Vásquez Carrera, por su orientación, paciencia y apoyo durante todo el proceso de investigación. Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento a los miembros del Tribunal de Titulación, MSc. Corrales Bonilla Johnatan Israel, MSc. Pazuña Naranjo William Paul y MSc. Borja Borja Cristian Darwin, por sus observaciones y recomendaciones, las cuales contribuyeron al fortalecimiento y culminación de este trabajo.

Finalmente, agradecemos a nuestros docentes, familiares, amigos y a todas aquellas personas que nos acompañaron durante esta etapa, brindándonos su apoyo, comprensión y motivación. Este logro representa no solo nuestro esfuerzo y dedicación, sino también el respaldo de quienes confiaron en nosotros y estuvieron presentes hasta alcanzar esta meta.

Johao

Salvatierra

DEDICATORIA

Agradezco primeramente a Dios, por darme la fortaleza, sabiduría y perseverancia necesarias para superar cada dificultad presentada durante mi formación académica y permitirme alcanzar esta importante meta en mi vida.

A mis padres, Lorena y David, por su amor, esfuerzo, confianza y apoyo incondicional a lo largo de este camino. Gracias por acompañarme en cada etapa, motivarme a continuar y ser un pilar fundamental para llegar hasta este momento. De manera especial, expreso mi sincero agradecimiento a mi tutor, MSc. Paco Jovanni Vásquez Carrera, por su orientación, paciencia y conocimientos brindados durante el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, agradezco a mi pareja, por su compañía, comprensión, paciencia y apoyo constante durante este proceso, especialmente en los momentos de mayor dificultad. A todas las personas que de una u otra manera estuvieron presentes y confiaron en mí, les expreso mi más sincera gratitud, ya que también forman parte de este logro.

Johao

DEDICATORIA

Agradezco a mis padres y hermanos por el apoyo incondicional a lo largo del transcurso de mi

vida, quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un propósito

más, gracias por los valores y principios compartidos.

A mis compañeros y amigos más cercanos que han sido un apoyo esencial en momentos de flaqueza,

durante todo este proceso de formación.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi por abrirme sus puertas y permitirme adquirir conocimientos

a través de cada uno de quienes conforman la misma.

Mi agradecimiento afectuoso y sincero a mi tutor de tesis MSc. Paco Jovanni Vásquez Carrera por su excelencia como docente, y por guiarme en todo el transcurso de este proyecto,

brindándome un soporte significativo con sus conocimientos y consejos que me servirán a lo largo

de mi vida profesional.

Agradezco de corazón a cada docente que me acompañó en esta carrera. Su paciencia, sus enseñanzas y sus exigencias no solo me formaron como profesional, sino que me desafiaron a superar mis propios límites. Cada clase, cada corrección y cada consejo dejó una huella imborrable en mi camino. Hoy cierro esta etapa con la certeza de que gran parte de lo que soy se lo debo a su dedicación y entrega. Gracias por guiarme, por creer en mí y por regalarme las herramientas para construir mi futuro.

A quienes mencione anteriormente mi eterno respeto, consideración y gratitud.

Salvatierra.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TÍTULO: IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN INTEGRAL PARA LA FABRICACIÓN Y ENSAMBLAJE DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO EN LA UTC EXTENSIÓN LA MANÁ.

Autores:

Johao David Robles Yasacama

Anderson Leonardo Salvatierra Tacle

RESUMEN

La investigación integró una fresadora CNC 3018 PRO MAX, herramientas de soldadura, instrumentos de diagnóstico y recursos de software para conformar una estación de fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso en la UTC Extensión La Maná. El procedimiento comprendió inventario, instalación, configuración, calibración inicial, preparación CAD/CAM, mecanizado, ensamblaje e inspección. La validación aplicó criterios visuales, eléctricos y funcionales sobre pistas, perforaciones, soldaduras, continuidad, aislamiento y respuesta del prototipo. La comparación con Makera Carvera Air identificó menor inversión directa y mayor integración académica en la estación UTC; la solución comercial dispone de cerramiento, nivelación automática, mayor potencia y cambio rápido de herramienta. El manual, el mantenimiento, las prácticas, las fichas técnicas y el control de archivos completan la documentación para una operación académica supervisada.

Descriptores: fabricación de PCB; mecanizado CNC; ensamblaje electrónico; prototipado electrónico; manufactura digital.

ABSTRACT

The research integrated a CNC 3018 PRO MAX router, soldering tools, diagnostic instruments, and software resources into a printed circuit board manufacturing and assembly station at UTC La Maná Extension. The procedure covered inventory, installation, configuration, initial calibration, CAD/CAM preparation, machining, assembly, and inspection. Validation applied visual, electrical, and functional acceptance criteria to tracks, drilling, solder joints, continuity, insulation, and prototype response. A comparison with Makera Carvera Air identified lower direct investment and broader academic integration for the UTC station; the commercial solution provides an enclosure, automatic leveling, higher spindle power, and quick tool change. The user manual, maintenance plan, laboratory practices, technical sheets, and file-control records complete the documentation required for supervised academic operation.

Keywords: PCB manufacturing; CNC machining; electronic assembly; electronic prototyping; digital manufacturing.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN 1

2. JUSTIFICACIÓN 2

3. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO 2

3.1 Beneficiarios principales 2

3.2 Beneficiarios secundarios 3

4. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 4

4.1 Problemática 4

4.2 Planteamiento del problema 5

5. OBJETIVOS 5

5.1 Objetivo general 5

5.2 Objetivos específicos 5

6. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS DE RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS 6

7 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA. 8

7.1 Fundamentación de la manufactura de PCB mediante mecanizado por control numérico computarizado (CNC) 8

7.1.1 Definición y funcionamiento de las PCB. 8

7.1.2 Que es un sistema de impresión y mecanizado de PCB mediante tecnología CNC 8

7.1.3 Métodos de fabricación de PCBs 8

7.1.4 Funcionamiento del sistema de control numérico computarizado. 11

7.1.5 Archivos GERBER 11

7.1.6 Evolución del formato GERBER 12

7.1.7 Codigos “G-code” 13

7.1.8 Estructura del bloque de instrucciones en control numérico 14

7.2 Entorno de trabajo 14

7.3 Velocidad de corte 16
7.4 Velocidad de avance 17
7.5 Sección de viruta 18
7.6 Volumen admisible de viruta 18
7.7 Fuerza de corte 18
7.8 Fuerza de empuje la máquina herramienta 20
7.9 Potencia neta 20
7.10 Sistema de transmisión 21
7.10.1 Fuerza resultante para los ejes X, Y, Z 21
7.10.2 Fuerza para mover la carga de los ejes X, Y, Z 21
7.10.3 Torque para la carga de los ejes X, Y, Z 22
7.11 Sistema electrónico 22
7.11.1 Dispositivo de accionamiento 23
7.11.2 Placa de control o Tarjeta controladora 25
7.11.3 Flujo de trabajo de software en CNC: CAD, CAM y Control 26
7.11.4 Algoritmos de control y espacios de ejecución 33
7.11.5 El intérprete de código G y flujo de datos 33
7.11.6 Tecnología de actuación y control 35
7.12 Herramientas de corte 36
7.12.1 Herramienta de desbaste 36
7.12.2 Herramienta de perforación 36
7.12.3 Herramienta de perfil 37
7.13 Estación de soldadura y retrabajo electrónico 37
7.13.1 Soldadura electrónica 38
7.13.2 Material de soldadura 39

7.13.3 Flux para soldadura 39
7.13.4 Tecnología de orificio pasante THT 40
7.13.5 Tecnología de montaje superficial SMT 41
7.13.6 Estación de soldadura 42
7.13.7 Cautín eléctrico 43
7.13.8 Estación de aire caliente 43
7.13.9 Retrabajo electrónico 44
7.13.10 Parámetros principales de la soldadura electrónica 45
7.13.11 Defectos comunes en las uniones soldadas 46
7.14 Inspección de placas de circuito impreso 46
7.14.1 Inspección visual de PCB 46
7.14.2 Defectos visibles en una PCB 47
7.14.3 Inspección óptica mediante microscopio digital 48
7.14.4 Características generales de un microscopio digital 48
7.14.5 Sistemas de sujeción para placas de circuito impreso 50
7.15 Verificación eléctrica de placas de circuito impreso 51
7.15.1 Prueba de continuidad 51
7.15.2 Circuito abierto 52
7.15.3 Cortocircuito 52
7.15.4 Medición de resistencia 53
7.15.5 Aislamiento eléctrico entre conductores 53
7.15.6 Multímetro digital 53
8 PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS. 55
9 METODOLOGÍA Y DISEÑOS EXPERIMENTAL. 55
9.1 Fases de la metodología 57

9.1.1 Fase 1: Escenario de implementación 58
9.1.2 Fase 2: Integración y acondicionamiento de la estación 61
9.1.3 Fase 3: Configuración y puesta en funcionamiento de la CNC 67
9.1.4 Fase 4: Preparación y fabricación de la PCB de prueba 73
9.1.5 Fase 5: Ensamblaje y validación experimental de la estación 84
10 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 94
10.1 Validación experimental de la estación integral 94
10.1.1 Resultados del ancho de las pistas 95
10.1.2 Resultados del diámetro de los orificios 95
10.1.3 Resultados del tiempo de manufactura 96
10.1.4 Resultados del montaje y soldadura 97
10.1.5 Resultados de la inspección óptica 97
10.1.6 Resultados de las comprobaciones eléctricas 98
10.1.7 Resultado de la prueba funcional del detector de fase 99
10.2 Evaluación funcional de la estación integral 100
10.2.1 Respuesta a la pregunta científica 101
10.3 Discusión de resultados 102
11 IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES Y ECONÓMICOS) 103
11.1 Impacto técnico 103
11.2 Impacto social 104
11.3 Impacto económico 105
12 PRESUPUESTO DEL PROYECTO 105
13 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 106
13.1 Conclusiones 106
13.2 Recomendaciones 107

14 BIBLIOGRAFIA 108

15 ANEXOS 113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Actividades y sistemas de tareas en relación con los objetivos 6

Tabla 2. Matriz de operacionalización de variables dependientes e independientes. 7

Tabla 3. Tabla principal de Candle GRBL 32

Tabla 4. Fresas tipo V de 0.1mm, 30° 36

Tabla 5. Fresas para perforado. 37

Tabla 6. Fresas de perfilado 37

Tabla 7. Comparación general entre tecnologías THT y SMT 41

Tabla 8. Elementos principales de un cautín eléctrico 43

Tabla 9. Parámetros principales de una estación de aire caliente 44

Tabla 10. Parámetros generales que intervienen en la soldadura electrónica 45

Tabla 11. Defectos comunes en una unión soldada. 46

Tabla 12. Defectos que pueden identificarse durante la inspección visual de una PCB 48

Tabla 13. Características generales consideradas en un microscopio digital para inspección electrónica 49

Tabla 14. Elementos comunes en un sistema de sujeción para PCB 51

Tabla 15. Funciones principales de un multímetro digital 54

Tabla 16. Pruebas eléctricas básicas aplicadas a una PCB 55

Tabla 17. Diferencias entre inspección visual y verificación eléctrica de una PCB 55

Tabla 18. Fases metodológicas desarrolladas en el proyecto 57

Tabla 19. Condiciones consideradas para el área de implementación 59

Tabla 20. Medidas básicas de seguridad consideradas en la estación _____ 61

Tabla 21. Equipos y herramientas incorporados en la estación integral _____ 64

Tabla 22. Elementos principales de la CNC Genmitsu 3018-PRO _____ 65

Tabla 23. Conexiones principales de la CNC Genmitsu 3018-PRO _____ 66

Tabla 24. Parámetros de comunicación entre la computadora y la CNC _____ 69

Tabla 25. Comprobación inicial del movimiento de los ejes _____ 70

Tabla 26. Comprobaciones previas del husillo _____ 71

Tabla 27. Referencias establecidas para el origen de trabajo _____ 72

Tabla 28. Lista de comprobación previa al mecanizado _____ 73

Tabla 29. Criterios considerados para la selección del circuito de prueba _____ 74

Tabla 30. Características de diseño de la PCB del detector de fase _____ 77

Tabla 31. Parámetros de mecanizado establecidos para la PCB del detector de fase _____ 81

Tabla 32. Secuencia aplicada durante la fabricación de la PCB del detector de fase _____ 84

Tabla 33. Parámetros considerados durante la medición dimensional de la PCB _____ 86

Tabla 34. Registro del tiempo durante la fabricación de la PCB _____ 87

Tabla 35. Componentes empleados en la PCB del detector de fase _____ 88

Tabla 36. Parámetros registrados durante el proceso de soldadura _____ 90

Tabla 37. Criterios empleados durante la inspección de la PCB _____ 91

Tabla 38. Pruebas eléctricas aplicadas al detector de fase _____ 92

Tabla 39. Criterios establecidos para la prueba funcional _____ 93

Tabla 40. Matriz de verificación funcional de la estación integral _____ 94

Tabla 41. Resultados de la medición del ancho de las pistas 95

Tabla 42. Resultados de la medición de los orificios de la PCB 96

Tabla 43. Tiempo registrado durante el mecanizado del detector de fase 96

Tabla 44. Resultados del montaje y soldadura del detector de fase 97

Tabla 45. Resultados de la inspección óptica del detector de fase 98

Tabla 46. Resultados de las comprobaciones eléctricas 99

Tabla 47. Resultados de la prueba funcional del detector de fase 100

Tabla 48. Resultados de la evaluación funcional de la estación integral 100

Tabla 49. Presupuesto de implementación de la estación integral para fabricación y ensamblaje de PCB 106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales beneficiarios principales. 3

Figura 2. Porcentaje de los beneficiarios secundarios y beneficiarios principales. 4

Figura 3: Procedimiento para la creación de una placa PCB por proceso químico. 9

Figura 4: Etapas del grabado químico PCB. 9

Figura 5: Método por mecanizado por control numérico computarizado (CNC). 10

Figura 6: Tres elementos básicos del control numérico. 11

Figura 7: Pistas de continuidad en archivo GERBER. 12

Figura 8: Estructura de un bloque de programación CNC. 14

Figura 9: Tendencias futuras en el montaje de placas de circuito impreso con taladros pasantes[13]. 15

Figura 10: Tecnología THT vs Tecnología SMT. 16

Figura 11: Sección transversal de un motor paso a paso 24

Figura 12: Escalones de motor paso a paso. 24

Figura 13: Motor de corriente continua de la maquina cnc. 25

Figura 14: Tarjeta GRBL 1.1 y distribución de conexiones de control 26

Figura 15: Proceso para realizar un circuito impreso. 27

Figura 16: Proteus desarrollo de circuitos desde el diseño del circuito eléctrico hasta la prueba de funcionamiento. 28

Figura 17: Flujo de operaciones del software FlatCAM 29

Figura 18: Interfaz de carga del FlatCAM 31

Figura 19: Ventana de trabajo software Candle GRBL _____ 31

Figura 20: Diagrama de interprete. _____ 34

Figura 21: Generación de código de acuerdo al control de la máquina. _____ 35

Figura 22: Esquema de motor DC y diagrama de control._____ 36

Figura 23. Estación de soldadura y retrabajo electrónico _____ 38

Figura 24. Presentaciones comunes de flux para soldadura electrónica._____ 40

Figura 25. Representación de la tecnología de orificio pasante THT._____ 41

Figura 26. Principales partes de una estación de soldadura. _____ 42

Figura 27. Funcionamiento de la pistola de aire caliente. _____ 44

Figura 28. Elementos principales de un microscopio digital. _____ 49

Figura 29. Sistema ajustable para sujeción de placas de circuito impreso. _____ 51

Figura 30. Elementos principales de un multímetro digital. _____ 54

Figura 31. Flujo general para la fabricación y ensamblaje de una PCB mediante la estación integral. _____ 57

Figura 32. Distribución del área de trabajo y ubicación de los principales equipos de la estación. 61

Figura 33. Distribución general de los equipos que conforman la estación integral. _____ 62

Figura 34. Distribución de las áreas funcionales de la estación para fabricación y ensamblaje de PCB._____ 63

Figura 35. Máquina CNC Genmitsu 3018-PRO integrada _____ 65

Figura 36. Esquema de conexión eléctrica y de control de la CNC Genmitsu 3018-PRO._____ 66

Figura 37. Identificación del puerto COM correspondiente a la CNC Genmitsu 3018-PRO._____ 68

Figura 38. Configuración del puerto de comunicación en Candle GRBL. 68

Figura 39. Ventana de Candle GRBL utilizada para el control de la CNC. 70

Figura 40. Comprobación manual de los movimientos de los ejes X, Y y Z. 71

Figura 41. Establecimiento del punto cero en los ejes X, Y y Z. 72

Figura 42. Circuito detector de fase seleccionado para la validación de la estación. 75

Figura 43. Diseño esquemático del detector de fase desarrollado en Proteus 8.17. 76

Figura 44. Vista tridimensional del detector de fase diseñada en Proteus 8.17. 77

Figura 45. Generación de archivos Gerber y Excellon del detector de fase. 78

Figura 46. Archivos de fabricación obtenidos desde Proteus 8.17. 78

Figura 47. Archivo Gerber del detector de fase cargado en FlatCAM 8.993 Beta. 79

Figura 48. Trayectoria de aislamiento de las pistas del detector de fase. 80

Figura 49. Perforaciones del detector de fase cargadas en FlatCAM 8.993 Beta. 81

Figura 50. Fijación de la placa para el mecanizado del detector de fase. 83

Figura 51. Fresado de aislamiento de las pistas del detector de fase. 83

Figura 52. Medición del ancho de las pistas de la PCB del detector de fase. 86

Figura 53. Medición de los orificios presentes en la PCB del detector de fase. 86

Figura 54. Colocación de los componentes del detector de fase sobre la PCB. 88

Figura 55. Proceso de soldadura de los componentes del detector de fase. 89

Figura 56. Inspección de la PCB del detector de fase mediante microscopio digital. 91

Figura 57. Comprobación de continuidad en la PCB del detector de fase. 92

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 9

Ecuación 2 17

Ecuación 3 17

Ecuación 4 18

Ecuación 5 18

Ecuación 6 19

Ecuación 7 19

Ecuación 8 19

Ecuación 9 20

Ecuación 10 20

Ecuación 11 21

Ecuación 12 21

Ecuación 13 21

Ecuación 14 22

Ecuación 15 86

Ecuación 16 94

Ecuación 17 99

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	PLANOS DE TRAPEZWELLE X ACHES	113
Anexo 2.	PLANOS DE SCHITTMOTOR	114
Anexo 3.	PLANOS DE SEITENTEIL LINKS	115
Anexo 4.	PLANOS DE ALUMINIUM PERFIL Y	116
Anexo 5.	PLANOS DE ALUMINIUN PROFIL X	117
Anexo 6.	PLANOS DE CNC 3018 PRO	118
Anexo 7.	PLANOS DE TISCH	119
Anexo 8.	DISEÑO DE LA MESA EN SIMULACION INVENTOR	120
Anexo 9.	PLANOS DE LA MESA	121

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la electrónica tiene una gran importancia dentro de la Ingeniería Electromecánica, ya que está presente en diferentes circuitos y sistemas utilizados en máquinas, equipos y procesos automatizados. Dentro de estos proyectos, las herramientas de trabajo cumplen un papel importante, pues ayudan a pasar de un diseño hecho en una computadora a un circuito físico, el cual posteriormente puede ser armado y puesto a prueba.

Las placas de circuito impreso, conocidas como PCB, forman parte fundamental de los circuitos electrónicos. En ellas se colocan los diferentes componentes y se establecen las conexiones mediante pistas de cobre. Durante la formación de los estudiantes, los programas de simulación, las protoboards y las placas perforadas son recursos comunes para las prácticas y la comprobación de circuitos. Sin embargo, estos métodos tienen ciertas limitaciones, especialmente cuando se busca obtener una placa propia a partir de un diseño elaborado por los estudiantes.

En la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná, en parte de la carrera de Ingeniería Electromecánica, se presenta la necesidad de contar con un espacio destinado al proceso completo de fabricación y ensamblaje de una PCB. Actualmente, los estudiantes cuentan con la posibilidad de diseñar y simular circuitos, pero no disponen de una estación integral donde puedan fabricar la placa, hacer las perforaciones, colocar los componentes, realizar la soldadura y comprobar finalmente su funcionamiento. Esta situación reduce las oportunidades de llevar a la práctica todo aquello que se aprende durante las clases.

Por esta razón, el presente proyecto plantea la implementación de una estación integral para la fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso en la UTC Extensión La Maná. La estación estará conformada por diferentes equipos y herramientas, cada uno destinado a una parte del proceso. Entre estas actividades se encuentran el trabajo de la placa mediante una máquina CNC, el montaje de los componentes, la soldadura y la revisión final del circuito.

Con esta estación, los estudiantes tendrán una experiencia más completa, ya que podrán conocer de cerca cada una de las etapas que existen desde el diseño de un circuito hasta obtener una placa electrónica terminada. Además, los conocimientos adquiridos en asignaturas como Circuitos Eléctricos y Electrónica tendrán una relación más directa con las actividades prácticas desarrolladas dentro del laboratorio.

De esta manera, el proyecto busca aportar al mejoramiento de las prácticas en el laboratorio de Electromecánica de la UTC Extensión La Maná. La estación no estará destinada únicamente al presente proyecto, sino que también quedará como un recurso para futuras prácticas, proyectos académicos, trabajos de titulación e investigaciones relacionadas con la electrónica, la automatización y el desarrollo de prototipos.

2. JUSTIFICACIÓN

La formación práctica en Ingeniería Electromecánica requiere que los estudiantes apliquen los conocimientos adquiridos en el aula mediante procesos reales de diseño, fabricación y montaje de circuitos electrónicos. Actualmente, la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná, no dispone de una estación específica en el área de la fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso, lo que limita el desarrollo completo de estas actividades dentro de sus laboratorios.

En asignaturas como Circuitos Eléctricos y Electrónica, los estudiantes utilizan simuladores, protoboards y placas perforadas para comprobar el funcionamiento de circuitos. Sin embargo, estos recursos no permiten desarrollar todas las etapas necesarias para obtener una PCB propia. La implementación de una estación integral posibilitará el diseño, mecanizado, ensamblaje, soldadura e inspección de las placas dentro de un mismo espacio de trabajo.

Esta propuesta fortalecerá las habilidades técnicas de los estudiantes, reducirá la dependencia de soluciones prefabricadas o servicios externos y ampliará las posibilidades de desarrollar las actividades prácticas, proyectos académicos e investigaciones, contribuyendo al fortalecimiento de la infraestructura de los laboratorios de la UTC Extensión La Maná.

3. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

3.1 Beneficiarios principales

Los beneficiarios principales del proyecto corresponden a los estudiantes de segundo y cuarto semestre de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná. Estos niveles fueron seleccionados debido a que cursan asignaturas directamente relacionadas con el análisis, diseño y montaje de circuitos eléctricos y electrónicos.

En segundo semestre, los estudiantes cursan la asignatura de Circuitos Eléctricos, donde emplean herramientas de simulación para el análisis y la comprobación del comportamiento de

diferentes circuitos. Por su parte, en cuarto semestre cursan Electrónica, asignatura en la que desarrollan actividades prácticas relacionadas con componentes electrónicos, montaje y verificación de circuitos.

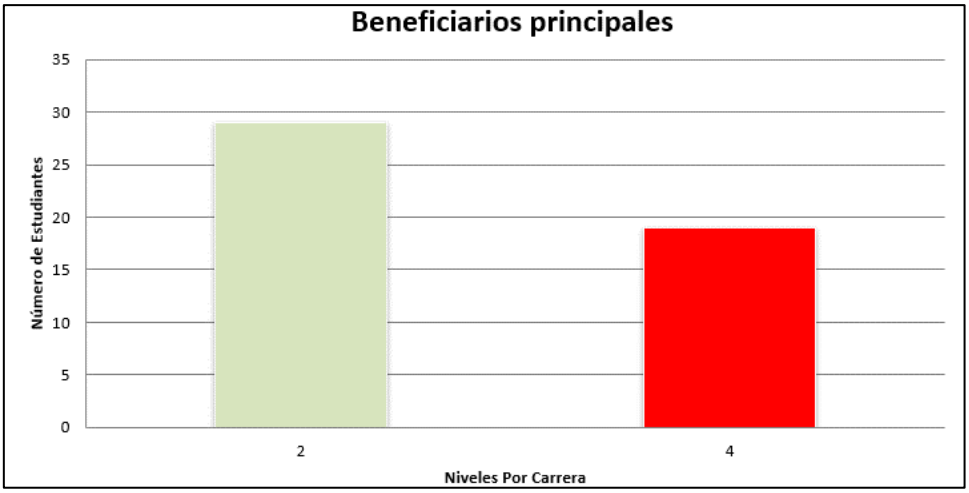


Figura 1. Principales beneficiarios principales.

La implementación de la estación integral permitirá complementar estas actividades mediante la fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso, facilitando que los diseños desarrollados previamente puedan ser llevados a un prototipo físico. Segundo semestre cuenta con 29 estudiantes y cuarto semestre con 19 estudiantes, dando un total de 48 beneficiarios principales según la Dashboard de la universidad.

3.2 Beneficiarios secundarios

Los beneficiarios secundarios del proyecto corresponden a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná, quienes podrán beneficiarse del fortalecimiento de la infraestructura tecnológica de los laboratorios y de la disponibilidad de una estación destinada a la fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso.

Aunque los estudiantes de segundo y cuarto semestre serán los principales participantes durante el desarrollo del proyecto, la estación permanecerá disponible como recurso académico para futuras prácticas, proyectos de investigación, trabajos de titulación y actividades relacionadas con electrónica, automatización, microcontroladores y desarrollo de prototipos. De igual manera, los docentes podrán utilizarla como herramienta de apoyo para complementar la enseñanza de contenidos teóricos y prácticos.

Asimismo, la estación podrá emplearse en ferias, congresos, casas abiertas y actividades demostrativas, permitiendo mostrar el proceso de diseño, fabricación y ensamblaje de circuitos electrónicos y contribuyendo al fortalecimiento de la formación académica y tecnológica de la carrera de Ingeniería Electromecánica

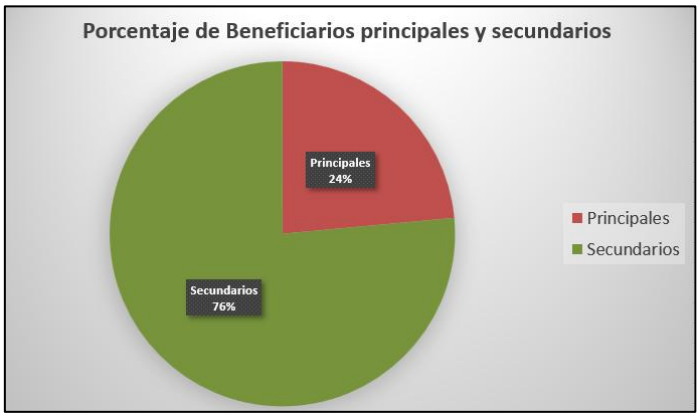


Figura 2. Porcentaje de los beneficiarios secundarios y beneficiarios principales.

4. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

4.1 Problemática

La carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná, contempla asignaturas como Circuitos Eléctricos y Electrónica, en las cuales los estudiantes desarrollan conocimientos relacionados con el análisis, simulación y montaje de circuitos. En los primeros niveles se emplean programas de simulación para comprobar ejercicios relacionados con circuitos en serie y paralelo, resistencias, capacitores, inductores, mallas y otras configuraciones eléctricas. Posteriormente, en Electrónica, las prácticas se realizan principalmente mediante protoboards y placas perforadas, utilizando componentes adquiridos por los propios estudiantes para efectuar montajes temporales o, en determinados casos, circuitos soldados.

Sin embargo, actualmente el laboratorio de Electromecánica no dispone de una estación que permita desarrollar de manera integrada la fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso. Esta situación impide que los estudiantes puedan transformar un diseño electrónico propio en una PCB fabricada físicamente, debido a que tampoco se dispone localmente de un servicio especializado para realizar este proceso.

La ausencia de este recurso limita la experiencia práctica relacionada con el mecanizado, ensamblaje, soldadura, inspección y comprobación de placas electrónicas. Por ello, se plantea

la implementación de una estación integral para la fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso en la UTC Extensión La Maná, mediante la integración de equipos y herramientas destinadas al mecanizado, soldadura, inspección y comprobación de circuitos electrónicos. Esta estación permitirá desarrollar de manera organizada las diferentes etapas del proceso dentro del laboratorio de Electromecánica y quedará disponible como recurso académico para futuras prácticas, proyectos y actividades formativas.

4.2 Planteamiento del problema

¿De qué manera la implementación de una estación integral para la fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso permitirá desarrollar los procesos de mecanizado, montaje, soldadura, inspección y verificación de circuitos electrónicos en el laboratorio de Electromecánica de la UTC Extensión La Maná?

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Implementar una estación integral para la fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso en el laboratorio de Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná, que permita desarrollar procesos de mecanizado, montaje, soldadura, inspección y verificación de circuitos electrónicos.

5.2 Objetivos específicos

- Analizar los fundamentos teóricos relacionados con el diseño, fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso, considerando los procesos de mecanizado CNC, soldadura, montaje de componentes e inspección de circuitos electrónicos, para establecer la base técnica necesaria para la implementación de la estación.
- Integrar los equipos y herramientas necesarios para conformar la estación de trabajo destinada a la fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso, garantizando su correcta distribución, instalación y operatividad dentro del laboratorio de Electromecánica.
- Validar el funcionamiento de la estación mediante la fabricación y ensamblaje de una placa de circuito impreso de prueba, verificando las etapas de mecanizado, montaje, soldadura, inspección y comprobación eléctrica del circuito.

6. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS DE RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Tabla 1. Actividades y sistemas de tareas en relación con los objetivos

Objetivo	Actividad	Resultado	Metodología
Analizar los fundamentos teóricos relacionados con el diseño, fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso, considerando los procesos de mecanizado CNC, soldadura, montaje de componentes e inspección de circuitos electrónicos, para establecer la base técnica necesaria para la implementación de la estación.	• Revisar bibliografía especializada sobre diseño de PCB, mecanizado por CNC, técnicas de soldadura e inspección de circuitos. • Sintetizar y sistematizar la información de los procesos clave de manufactura y montaje electrónico.	Marco teórico estructurado y estado del arte documentado sobre la fabricación y ensamblaje de PCB mediante CNC. Documento de requerimientos técnicos e insumos necesarios para la implementación de la estación.	**Investigación documental y bibliográfica:** Búsqueda, selección y análisis crítico de libros, artículos científicos, manuales técnicos de maquinaria CNC y normas internacionales **Análisis cualitativo:** Comparativa de parámetros de proceso (velocidades de avance, tipos de brocas/fresas, técnicas de soldadura) para definir las mejores prácticas.
Integrar los equipos y herramientas necesarios para conformar la estación de trabajo destinada a la fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso, garantizando su correcta distribución, instalación y operatividad dentro del laboratorio de Electromecánica.	• Diseñar e implementar la distribución física del espacio de trabajo considerando ergonomía, seguridad eléctrica e iluminación. • Montar e interconectar la fresadora CNC, la estación de soldadura y la instrumentación de pruebas.	Estación de trabajo para fabricación y ensamblaje de PCB instalada, interconectada y 100% operativa en el laboratorio. Manual o protocolo de calibración y distribución del área de trabajo.	**Integración física y electromecánica:** Ensamblado de componentes hardware, conexionado de alimentaciones eléctricas y ajuste fino mecánico de componentes. **Pruebas de funcionamiento y calibración:** Verificación metrológica del plano de fresado y calibración del punto cero (Z-zero) de la maquina CNC.
Validar el funcionamiento de la estación mediante la fabricación y ensamblaje de una placa de circuito impreso de prueba, verificando las etapas de mecanizado, montaje, soldadura, inspección y comprobación eléctrica del circuito.	• Generar los archivos Gerber y Código G del circuito de prueba desde un software CAD/CAM. • Ejecutar el mecanizado CNC (aislamiento de pistas, perforado y ruteado de contornos) en la placa PCB. • Realizar el montaje de componentes y soldadura (tecnología THT y/o SMT). • Ejecutar la inspección visual/óptica de las pistas y realizar pruebas de continuidad, aislamiento y funcionamiento eléctrico del circuito final.	Prototipo de PCB de prueba completamente fabricado, ensamblado y operativamente funcional. Informe técnico de validación y matriz de verificación de parámetros del proceso.	**Diseño y manufactura asistida por computador (CAD/CAM):** Conversión de esquemáticos a trazados físicos. **Pruebas y ensayos experimentales:** Mecanizado por arranque de viruta, técnica de soldadura y ensamble mecánico. **Metodología de inspección y control de calidad:** Control óptico de aislamiento entre pistas y pruebas metrológicas/eléctricas con multímetro y microscopio digital para verificar la ausencia de cortocircuitos y el correcto paso de señal.

Tabla 2. Matriz de operacionalización de variables dependientes e independientes.

Variable Independiente: SISTEMA DE IMPRESIÓN DE PCB PARA CIRCUITOS ELECTRÓNICOS (CNC)					
Descripción	**Categoría**	**Indicadores**	**Ítem**	**Técnicas de medida**	**Instrumentos**
La automatización en la fabricación de circuitos impresos se fundamenta en la tecnología CNC, la cual ejecuta trayectorias complejas de alta precisión para realizar el aislamiento y grabado de las pistas conductoras en la capa de cobre.	Sistema Mecánico	Área de trabajo	mm	Observación	Módulo de trabajo
		Velocidad de corte	mm/min	Cálculos	Ecuaciones
		Velocidad de avance	mm/min	Cálculos	Ecuaciones
	Sistema de Transmisión	Fuerza resultante ejes X, Y, Z	N	Cálculos	Ecuaciones
		Fuerza para mover la carga X, Y, Z	N	Cálculos	Ecuaciones
		Torque de la carga X, Y, Z	Nm	Cálculos	Ecuaciones
	Sistema Electrónico	Actuador	Motores	Observación	Datasheet Tabla Comparativa
		Controlador	Placa controladora CNC GRBL	Observación	Tabla Comparativa
		Software	CAD/CAM	Observación	Tabla Comparativa
	Sistema Eléctrico	Alimentación	V	Observación	Tabla Comparativa
		Máquina	W	Observación	Tabla Comparativa
	Sistema Estructural	Modelado estructural	SolidWorks	Modelación	Software
		Materia prima de la estructura	Material (estructura)	Observación	Tabla (Características)
		Componentes estructurales ejes X, Y, Z	Piezas fijas y móviles	Observación	Características
Variable Dependiente: TIEMPO DE FRESADO Y PERFORADO EN LA PLACA					
Descripción	**Categoría**	**Indicadores**	**Ítem**	**Técnicas de medida**	**Instrumentos**
El sistema CNC procesa la placa de baquelita o fibra de vidrio ejecutando dos operaciones clave: el fresado para el aislamiento de pistas mediante remoción de cobre y el taladrado para la perforación de los componentes.	Proceso de fresado, perforado y cortado	Ancho de las pistas	mm	Medición	Calibrador (Computarizado)
		Diámetro de los orificios	mm	Observación	Tabla (Sugerida)
		Tiempo de manufactura	s	Medición	Cronómetro

7 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA.

7.1 Fundamentación de la manufactura de PCB mediante mecanizado por control numérico computarizado (CNC)

7.1.1 Definición y funcionamiento de las PCB.

Una placa de circuito impreso (PCB) es una estructura en capas que se utiliza para soportar mecánicamente y conectar eléctricamente componentes electrónicos. Consiste en trazas de cobre conductoras laminadas sobre un sustrato no conductor, normalmente FR-4, un laminado epoxi reforzado con vidrio. Estos rastros forman las vías eléctricas que dirigen las señales y la energía entre componentes como resistencias, condensadores, microprocesadores y conectores. Las PCB están diseñados según especificaciones precisas, teniendo en cuenta la integridad de la señal, el rendimiento térmico, las limitaciones mecánicas y la capacidad de fabricación. Los diseños pueden incluir una o varias capas de cobre, componentes de montaje superficial o con orificios pasantes y características como vías ciegas o enterradas para optimizar el espacio y la función. Las máscaras de soldadura y las capas de serigrafía ayudan en el ensamblaje y la identificación, mientras que los recubrimientos o encapsulantes brindan protección ambiental[1].

7.1.2 Que es un sistema de impresión y mecanizado de PCB mediante tecnología CNC

La fresadora CNC de PCB es un sistema típico de control de movimiento punto a punto de motores paso a paso y un equipo clave para el mecanizado de agujeros de precisión de placas de circuito impreso. En consecuencia, el sistema mecanizado por control numérico computarizado (CNC) de PCB se está desarrollado hacia una dirección abierta de alta velocidad, alta precisión, alta fiabilidad, integración de sistemas de alta eficiencia[2].

7.1.3 Métodos de fabricación de PCBs

Los métodos de fabricación para realizar un pcb se puede clasificar en dos tipos: método tradicional en base de ataque químico o planchado y por medio de mecanizado por control numérico computarizado (CNC).

7.1.3.1 *Método de aplicación de químicos o planchado*

El método por aplicación química o planchado consiste en una remoción por disolución anódica o ataque corrosivo sustractivo controlado (Acido) su propósito es transformar la lámina continua de cobre en una red de conductores (pistas) el objetivo del ácido es disolver selectivamente las áreas de cobre expuestas que no formen parte del circuito, dejando intactas aquellas áreas protegidas por la máscara de tóner[3].

El reactivo comúnmente más utilizado en entornos de laboratorio y prototipado es el Cloruro Férrico ($FeCl_3$), actúa mediante una reacción de oxidación - reducción (redox):

$$2FeCl_3 + Cu \rightarrow 2FeCl_2 + CuCl_2 \quad (1)$$

- Oxidación: el cobre metálico (Cu^0) cede electrones y pasa a ser soluble en el líquido como cloruro cúprico ($CuCl_2$).
- Reducción: El hierro con el estado de oxidación +3(Fe^{3+}) gana electrones y se reduce a hierro +2(Fe^{2+})[4].

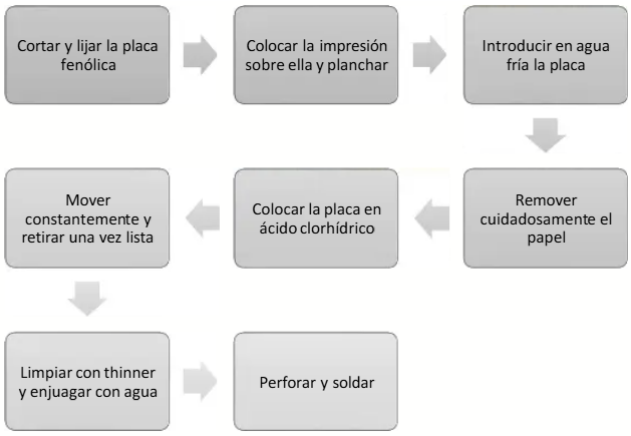


Figura 3: Procedimiento para la creación de una placa PCB por proceso químico[4].



Figura 4: Etapas del grabado químico PCB[5].

7.1.3.2 Método de fabricación mecanizado por control numérico computarizado (CNC).

El método de sustracción mecánica de pistas, contornos y perforaciones mediante una fresadora CNC prescinde del uso de reactivos químicos nocivos como el cloruro férrico. Este procedimiento se fundamenta en la generación de código G a partir del diseño de la placa de circuito impreso (PCB). Posteriormente, dicho código es procesado por un controlador numérico que dirige la herramienta de corte para remover el exceso de material y definir con precisión la topología del circuito.

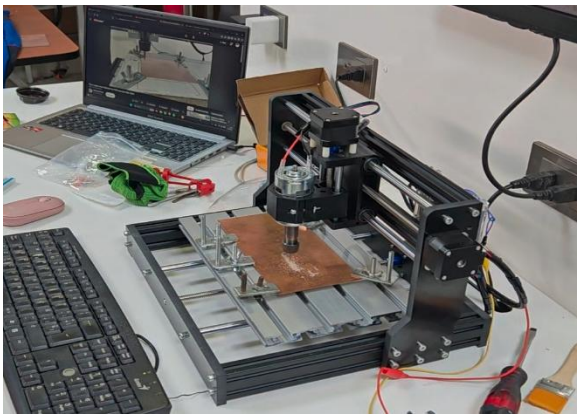


Figura 5: Método por mecanizado por control numérico computarizado (CNC).

El control numérico computarizado (CNC) es un sistema que permite controlar en todo momento la posición de un elemento físico, normalmente una herramienta montada en una máquina. Este principio es la base del sistema de impresión de placas de circuito impreso (PCB)[6].

La máquina herramienta ha sido fundamental para el desarrollo tecnológico, ya que su uso ha permitido avanzar en el campo de la maquinaria. De hecho, algunas de estas máquinas pueden realizar al mismo tiempo operaciones de fresado, torneado y taladrado[6].

Los elementos básicos del control numérico son tres:

- El programa, que contiene toda la información de las acciones que se van a ejecutar.
- El controlador numérico, que envía las instrucciones y después verifica que se cumplan.
- La máquina, que ejecuta las operaciones indicadas.

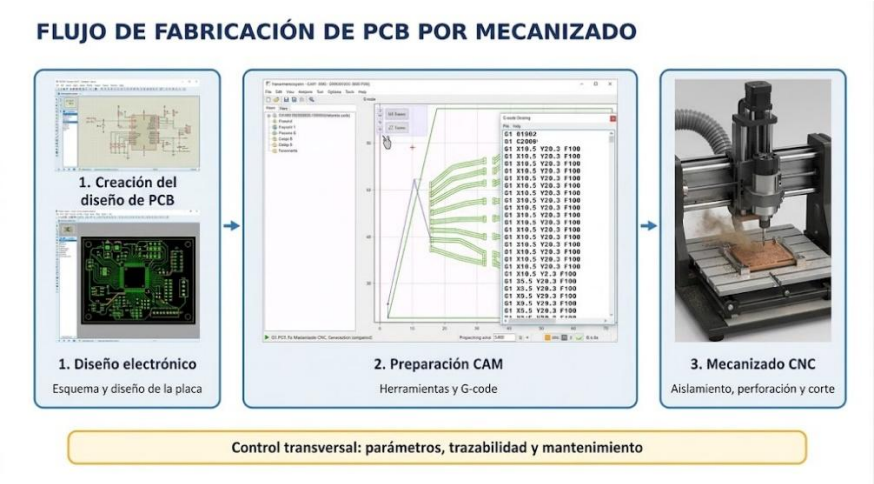


Figura 6: Tres elementos básicos del control numérico.

7.1.4 Funcionamiento del sistema de control numérico computarizado.

El control numérico no se limita a la regulación de las coordenadas X, Y y Z, sino que también gobierna la trayectoria de desplazamiento entre ellas, la velocidad y otros parámetros adicionales. Estos sistemas se encuentran plenamente integrados en las máquinas herramienta[7].

A continuación, se describen dos tipos de archivos que, al operar de manera conjunta, resultan fundamentales para el funcionamiento de una máquina CNC.

7.1.5 Archivos GERBER

El archivo Gerber es uno de los elementos clave en el diseño de los PCB. Su nombre proviene de Gerber Systems Corp., la primera empresa que desarrolló este tipo de archivos. En esencia, describe las características de la placa, como las capas de la máscara de soldadura, la leyenda y la plantilla de perforación [8].

Los primeros archivos Gerber utilizaban el formato RS-274-D y solo contenían coordenadas XY junto con comandos de dibujo y de destello (flash) [9].

Hoy en día, la mayoría de los programas CAD para placas de circuito impreso pueden generar archivos Gerber a partir de sus datos de diseño. De esta forma, los pads circulares de los pines de un orificio pasante se representan mediante un comando acompañado de algunas coordenadas de ubicación, mientras que un trazo de línea se representa con un código de comando de dibujo junto con las coordenadas de cada vértice del trazo [9].

Un archivo Gerber se compone de cuatro elementos:

- Parámetros de configuración.
- Definiciones de apertura.
- Coordenadas XY para los comandos de dibujo.
- Códigos de comando para dibujo.

Estos códigos existen porque los archivos Gerber fueron diseñados originalmente para controlar un trazador que creaba las capas de la placa sobre una película.

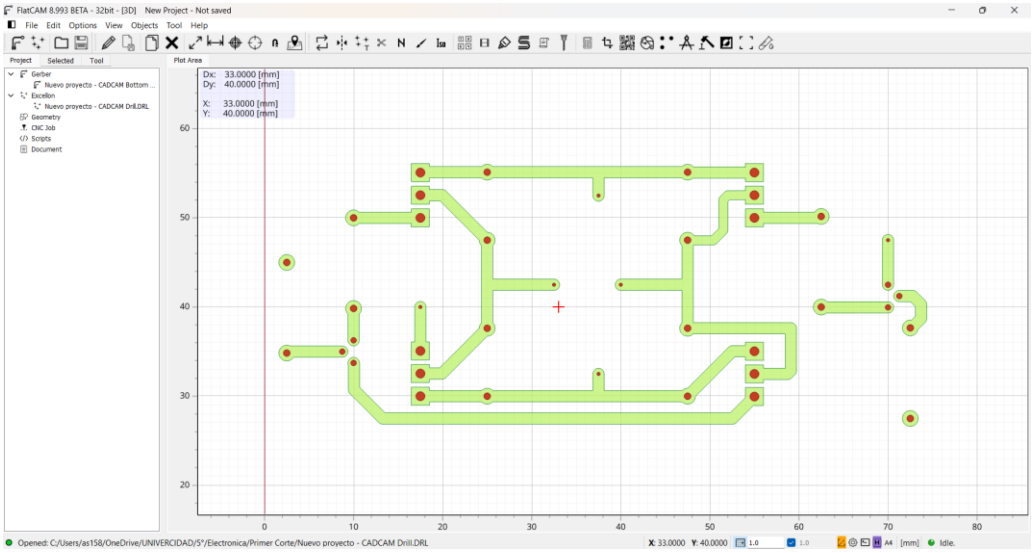


Figura 7: Pistas de continuidad en archivo GERBER.

7.1.6 Evolución del formato GERBER

Desde su introducción en la década de 1960, los archivos Gerber han experimentado cambios sustanciales. El conocimiento de los distintos formatos existentes resulta esencial para garantizar que los equipos modernos de fabricación de PCB procesen dichos archivos de manera adecuada y eficiente[10].

- **RS274-D**

  El formato RS-274-D, conocido como Gerber estándar, se basaba en un formato de control numérico (NC) y era compatible con diversos trazadores fotográficos utilizados durante la década de 1970. No obstante, presentaba múltiples limitaciones, entre ellas la introducción manual de los códigos D y la dependencia de la interpretación del operador, lo que motivó el desarrollo posterior de otros tipos de archivos Gerber[10].

- **RS-274X**

El formato RS-274X, también denominado Gerber ampliado, constituye actualmente el estándar industrial, ya que integra la totalidad de la información en cada archivo. A diferencia de los formatos anteriores, incorpora de manera embebida las definiciones de apertura, los sistemas de coordenadas y la información de capas, lo que reduce la ambigüedad y disminuye los tiempos de procesamiento. Debido a su compatibilidad y fiabilidad a nivel general, la mayoría de los ingenieros CAM recomienda este formato para los nuevos diseños[10].

- **Gerber X2**

  Presentado en 2014, el formato Gerber X2 se fundamenta en el estándar RS-274X e incorpora metadatos estructurados, tales como la identificación de la función de cada capa, la intención del diseño y la especificación de los materiales. Esta información adicional posibilita la verificación automática de las reglas de diseño para manufacturabilidad (DFM) y permite recomendar mejoras antes de la etapa de fabricación[10].

- **Gerber X3**

  El formato Gerber X3 mantiene la exportación de un conjunto de archivos que contienen los datos de fabricación, con un archivo por cada capa. A diferencia de las versiones anteriores, el formato X3 permite incluir datos de componentes y de ensamblaje directamente en la exportación Gerber, información que previamente requería exportaciones adicionales desde el diseño del PCB[10].

7.1.7 Codigos “G-code”

Los códigos G constituyen la base del lenguaje de programación CNC. Estos comandos definen el comportamiento de la máquina, su desplazamiento a lo largo de los ejes y la ejecución de cada operación de mecanizado. Asimismo, permiten que las máquinas operen de forma autónoma siguiendo instrucciones numéricas exactas[11].

En el ámbito del mecanizado CNC, los códigos G desempeñan un papel fundamental en el control del movimiento de las herramientas, garantizando que cada proceso se ejecute con precisión. Dichos códigos se estandarizaron bajo el formato RS-274; si bien los fabricantes de máquinas pueden introducir variaciones particulares, la estructura central de la programación con códigos G se mantiene constante en fresadoras, tornos y máquinas multieje [11].

7.1.8 Estructura del bloque de instrucciones en control numérico

La estructura de un bloque de instrucciones destinado a ser enviado a una máquina CNC debe cumplir con determinadas características. La máquina ejecuta las órdenes u operaciones conforme a los datos proporcionados por cada instrucción; por ello, cada orden posee una estructura definida y se denomina bloque de programa[12].

En términos generales, cada bloque está conformado por los siguientes elementos:

a) Número de bloque, correspondiente al número de línea del programa.
b) Código de orden de configuración, que define la función de maquinado.
c) Parámetros de la función de maquinado, tales como las coordenadas X, Y, Z y parámetros complementarios, además de los comentarios.

A continuación, se presenta el formato de un bloque de instrucciones.

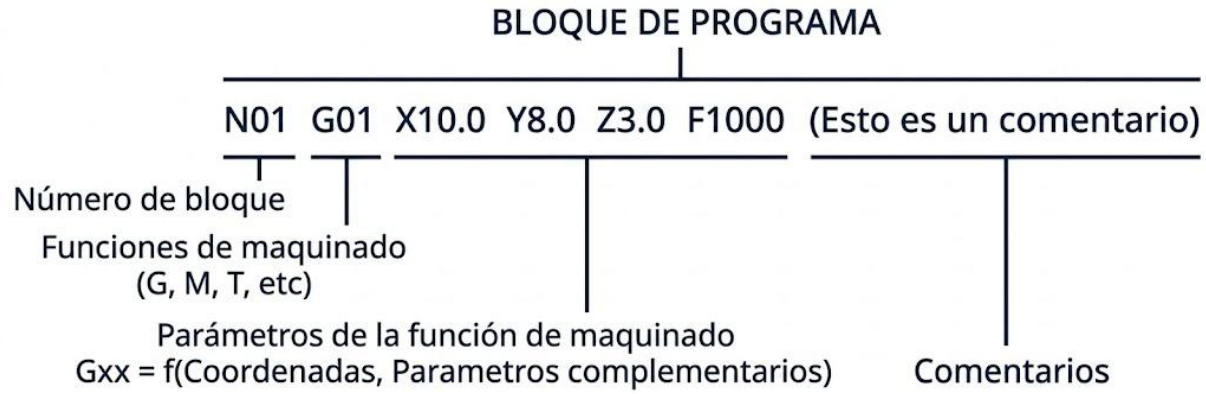


Figura 8: Estructura de un bloque de programación CNC [11], [12].

7.2 Entorno de trabajo

La mesa de trabajo constituye el componente físico de la máquina CNC destinado a servir de soporte y superficie de fijación del material o pieza sobre la cual se ejecutan las operaciones de manufactura. Se trata del espacio en el que interactúan la herramienta de corte y la pieza de trabajo; por consiguiente, sus características geométricas, dimensionales y de sujeción inciden directamente en la precisión, la estabilidad y la repetibilidad del proceso de mecanizado.

En el caso particular de una máquina CNC orientada al mecanizado de placas de circuito impreso, la mesa de trabajo debe garantizar la correcta inmovilización del sustrato durante

las operaciones de fresado, taladrado y ranurado, con el fin de minimizar vibraciones y desplazamientos no deseados que puedan afectar la calidad dimensional de los PCB.

- (THT) Tecnología de orificio pasante

  La tecnología de agujeros pasantes (Through-Hole Technology, THT) constituye un método tradicional para el montaje de componentes electrónicos sobre placas de circuito impreso (PCB). Esta técnica requiere que los terminales de los componentes atraviesen orificios previamente perforados en la placa, para luego ser soldados y fijados en la cara opuesta. En el ámbito del ensamblaje de PCB, se reconoce que la THT continúa desempeñando una función insustituible en la fabricación de productos electrónicos modernos[13].

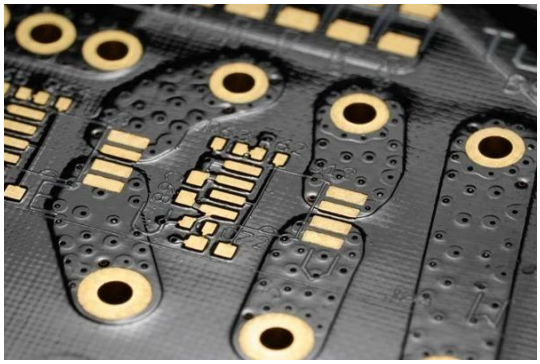


Figura 9: Tendencias futuras en el montaje de placas de circuito impreso con taladros pasantes[13].

  La THT puede clasificarse en montaje manual y montaje automatizado. El montaje manual resulta adecuado para la producción de lotes reducidos o para la elaboración de prototipos, mientras que el montaje automatizado permite alcanzar una producción en masa de alta eficiencia mediante el empleo de máquinas de inserción especializadas. Aunque la tecnología de montaje superficial (SMT) se ha generalizado, la THT mantiene su relevancia en numerosas aplicaciones debido a sus ventajas particulares[13].

- (SMT)Tecnología de montaje superficial

  La tecnología de montaje superficial (Surface-Mount Technology, SMT) es el método de construcción de dispositivos electrónicos más utilizado en la actualidad. Se emplea tanto para componentes activos como pasivos y se fundamenta en la fijación de los componentes de montaje superficial (Surface-Mounted Component, SMC) directamente sobre la superficie del circuito impreso. Tanto los equipos fabricados mediante esta técnica como los propios

componentes de montaje superficial se denominan dispositivos de montaje superficial (Surface-Mount Device, SMD). A diferencia de los componentes de tecnología de agujeros pasantes, que atraviesan la placa de circuito impreso de un lado a otro, los componentes SMD, de dimensiones considerablemente menores, no la atraviesan; sus conexiones se establecen mediante contactos planos, una matriz de esferas situada en la cara inferior del encapsulado o terminaciones metálicas ubicadas en los bordes del componente[14].

Esta tecnología ha superado y sustituido ampliamente a la de agujeros pasantes en aplicaciones de producción masiva (superiores a miles de unidades), de bajo consumo energético (como dispositivos portátiles), de baja temperatura o de múltiples aplicaciones en espacios reducidos (tales como equipos de cómputo, medición e instrumentación). No obstante, debido al reducido tamaño de los componentes, el ensamblado manual resulta complejo; por consiguiente, se requiere una mayor automatización en las líneas de producción y la implementación de técnicas de diseño más avanzadas que garanticen un funcionamiento adecuado de los SMD incluso en entornos con altos niveles de interferencia electromagnética (EMI)[14].

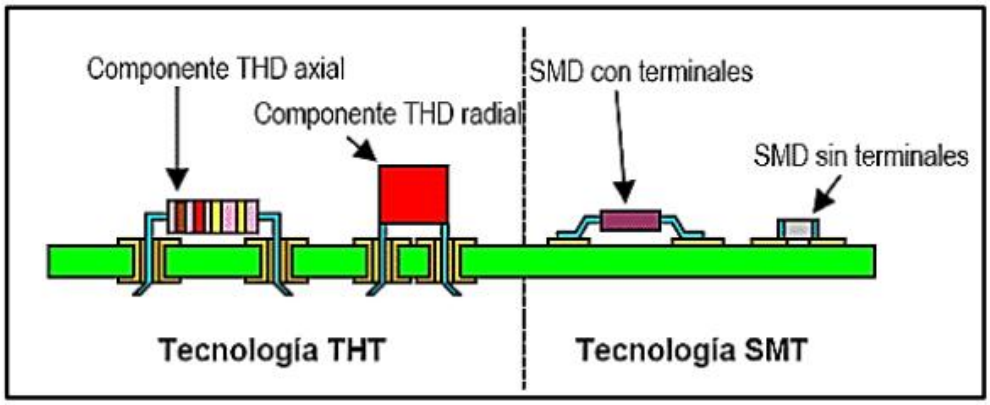


Figura 10: Tecnología THT vs Tecnología SMT[14].

7.3 Velocidad de corte

La velocidad de corte se define como la distancia, expresada en metros, recorrida por la herramienta en un minuto [15]. Para su determinación resulta indispensable conocer el tipo y las dimensiones de la herramienta de corte, ya que a partir de dichas dimensiones se establece el valor de la velocidad[16].

Su cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$n = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D} \quad (1)$$

Donde:

- V_c = Velocidad de corte (m/min)
- D = Diámetro de la fresa (mm)
- n = Número de revoluciones por minuto (rpm)

La velocidad de corte tiene relación sobre la velocidad de avance, tal como se indica en la siguiente expresión.

7.4 Velocidad de avance

La velocidad de avance es la distancia que recorre la herramienta de corte en relación con la pieza que se está mecanizando. Calcularla es importante porque ayuda a evitar que la fresa se rompa y que el motor a paso se sobrecaliente[15], [16]. Para obtenerla se utiliza la siguiente expresión:

$$Va = Sz \times z \times N \quad (2)$$

En la ecuación (3) intervienen los siguientes parámetros:

- V_a = Denota la velocidad de avance, expresada en (mm/min)
- S_z = Representa el avance por diente, también en (mm)
- z = Corresponde al número de dientes de la fresa
- N indica la velocidad de rotación del husillo, medida en revoluciones por minuto (rpm).

La viruta, por su parte, se define como el material que se desprende de la pieza durante el proceso de mecanizado; su formación está directamente condicionada por la velocidad de avance a la que se somete el material.

7.5 Sección de viruta

La sección de viruta se define como el producto entre el avance por diente y la profundidad de corte[17]. Para determinar su valor se emplea la siguiente expresión:

$$Sv = a \times Sz \quad (3)$$

Donde:

- A_v = Sección de viruta (mm^2)
- a = Profundidad de corte o fresado (mm)
- S_z = Avance por diente (mm)

La cantidad de material removido durante el proceso de mecanizado debe ser la adecuada para evitar daños en la herramienta de corte.

7.6 Volumen admisible de viruta

Dado que el mecanizado es un proceso de arranque de viruta, el caudal de material removido[18], [19]. Se determina mediante la siguiente expresión:

$$V = \frac{a \times b \times Va}{1000} \quad (4)$$

Donde:

- Q = Volumen de viruta (cm^3/min)
- a = Profundidad de corte o fresado (mm)
- b = Ancho de la fresa (mm)
- V_a = Velocidad de avance (mm/min)

El conocimiento de los parámetros anteriormente señalados resulta determinante, puesto que condicionan directamente la selección de la máquina herramienta[18].

7.7 Fuerza de corte

La fuerza de fresado constituye el esfuerzo al que se somete la máquina herramienta durante el arranque de material y representa un parámetro esencial en el mecanizado de la pieza. Para lograr un mecanizado adecuado de la placa de cobre, es necesario establecer

una presión de corte conveniente y controlar el volumen de viruta desprendida; en consecuencia, dicha fuerza especifica la solicitación mecánica a la que debe someterse el material[20].

Su valor se determina mediante la siguiente expresión:

$$Fc = Ks \times Sv \quad (5)$$

Donde:

- K_s = Constante de proporcionalidad
- S_v = Sección de viruta (mm²)

A su vez, la constante de proporcionalidad se calcula con la siguiente relación:

$$Ks = Kso \times e^{-b'} \quad (6)$$

Donde:

- K_{so} = Presión específica de corte (N/mm²)
- b' = Factor de corrección

El espesor de viruta se obtiene mediante la expresión:

$$e = \left(\frac{Va}{z \times N}\right) \times \left(\sqrt{\frac{a}{b}}\right) \quad (7)$$

Donde:

- e = Espesor de viruta (mm)
- V_a = Velocidad de avance (mm/min)
- z = Número de dientes de la fresa
- N = Número de revoluciones por minuto (rpm)+

Asimismo, los parámetros a (profundidad de corte o fresado, en mm) y b (ancho de la fresa, en mm) intervienen en la determinación de la sección y el volumen de viruta descritos previamente[20].

7.8 Fuerza de empuje la máquina herramienta

La fuerza de empuje de la máquina herramienta constituye el esfuerzo aplicado durante el proceso de mecanizado y determina la carga de fresado que debe ejercerse sobre el material[20]. Su valor se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T = 0.05K_dF_fF_tBW + 0.007K_dD^2JW \quad (8)$$

Donde:

- F = Fuerza o empuje de la máquina herramienta (N)
- K_d = Factor de trabajo del material
- F_f = Factor de avance (mm/rev)
- F_t = Factor de empuje en función del diámetro de la fresa (mm/diente)
- B = Factor de punto de la fresa para empuje
- W = Factor de desgaste de la herramienta (mm)
- D = Diámetro de la fresa (mm)
- J = Factor de punta de la fresa

Una vez establecidas las expresiones necesarias para el mecanizado de la placa, deben considerarse los pesos y las fuerzas que intervienen en el sistema de transmisión.

7.9 Potencia neta

La potencia suministrada por la máquina herramienta —en este caso, el motor a paso o motor de husillo— corresponde a la energía necesaria para efectuar el mecanizado de la placa fenólica[20]. Para su determinación se emplean las siguientes expresiones:

$$Pn = \frac{V}{V'} \quad (9)$$

Donde:

- V = Volumen de viruta (cm^3/min)
- V' = Cantidad admisible de viruta (cm^3/min)

De manera análoga, para la selección del motor a paso o motor de husillo se establece una eficiencia del 80 %, y la potencia se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P = \frac{P'}{\eta} \quad (10)$$

Donde:

- P' = Potencia neta (kW)
- η = Eficiencia
- P = Potencia resultante (W)

7.10 Sistema de transmisión

7.10.1 Fuerza resultante para los ejes X, Y, Z

La fuerza asociada a cada eje, expresada en newtons (N), se obtiene a partir del producto entre la masa del eje y la aceleración de la gravedad; este valor permite cuantificar la carga inercial que actúa sobre un punto específico de la estructura[21]. Su determinación se realiza mediante la siguiente expresión:

$$P_{eje} = M_{eje} \times g \quad (11)$$

Donde:

- F_{eje} = Fuerza generada por el eje debido a la inercia (N)
- M_{eje} = Masa de cada eje (kg)
- g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

7.10.2 Fuerza para mover la carga de los ejes X, Y, Z

Resulta indispensable determinar la fuerza generada por la máquina herramienta, puesto que es la responsable del desbaste del material y su magnitud depende de la estructura móvil del sistema. Por consiguiente, para desplazar un elemento específico es necesario calcular la fuerza que actúa sobre cada eje[21].

Dicha fuerza se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$F_{eje} = T + P_{eje} \times \mu \quad (12)$$

Donde:

- F_{eje} = Fuerza necesaria para mover la carga del eje (N)
- T = Fuerza o empuje de la máquina herramienta (N)
- P_{eje} = Fuerza del eje producida por inercia (N)
- μ = Coeficiente de fricción

7.10.3 Torque para la carga de los ejes X, Y, Z

En los dispositivos CNC, los motores paso a paso constituyen los actuadores más utilizados y son los principales responsables del movimiento de cada eje de desplazamiento. En consecuencia, resulta necesario determinar el torque requerido para lograr un desplazamiento adecuado[21].

Dicho torque se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T_{eje} = F_{eje} \times \frac{P}{2\pi\eta} \quad (13)$$

Donde:

- T_{eje} = Torque de la carga del eje (N·m)
- F_{eje} = Fuerza necesaria para mover la carga del eje (N)
- P = Paso del husillo (m)
- η = Rendimiento del husillo de paso

7.11 Sistema electrónico

El sistema electrónico es el responsable de la activación de los distintos actuadores, controladores y software que integran la máquina CNC. Está conformado por diversos componentes que posibilitan la interacción directa entre el equipo y el operador, garantizando de este modo un desempeño adecuado en las etapas de diseño, movimiento y desplazamiento de los elementos que constituyen la máquina[22].

7.11.1 Dispositivo de accionamiento

Los dispositivos de accionamiento son componentes capaces de transformar distintos tipos de energía con el fin de generar una función específica dentro de un sistema automatizado determinado [23]. Dichos dispositivos pueden ejecutar movimientos de tipo lineal, rotativo y oscilatorio, los cuales resultan fundamentales en una máquina CNC.

Existen diferentes clases de dispositivos de accionamiento, todas ellas orientadas a proporcionar el movimiento necesario para las aplicaciones CNC; a continuación, se detallan algunos de ellos.

7.11.1.1 Motores paso a paso

El motor de pasos, también denominado motor paso a paso es un dispositivo de accionamiento eléctrico cuyo rasgo distintivo radica en que su eje gira mediante incrementos angulares discretos, es decir, se desplaza una cantidad fija de grados por cada paso. Dicha particularidad es consecuencia de su configuración interna y permite determinar con exactitud la posición angular del eje a partir del conteo de los pasos realizados, sin necesidad de incorporar sensores de realimentación. Asimismo, esta propiedad lo convierte en un componente idóneo para una amplia variedad de aplicaciones.

- Principios de funcionamiento de los motores paso a paso
  Al igual que los demás motores eléctricos, el motor paso a paso está compuesto por una parte fija, denominada estator, y una parte móvil, conocida como rotor. En el estator se disponen una serie de dientes sobre los cuales se conectan las bobinas, mientras que el rotor puede estar constituido por un imán permanente o por un núcleo de hierro de reluctancia variable. Las distintas configuraciones constructivas del rotor se analizarán con mayor profundidad más adelante. En la Figura 9 se muestra un esquema de la sección transversal del motor, en el que el rotor corresponde a un núcleo de hierro de reluctancia variable[24].

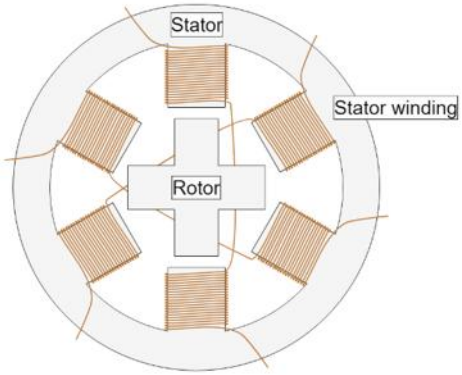


Figura 11: Sección transversal de un motor paso a paso

El principio fundamental de operación del motor paso a paso se describe de la siguiente manera: al energizar una o varias fases del estator, la corriente que circula por la bobina genera un campo magnético, y el rotor se orienta de acuerdo con la dirección de dicho campo. Mediante la excitación secuencial de las distintas fases, es posible lograr que el rotor gire una cantidad determinada hasta alcanzar la posición final requerida. En la Figura 10 se presenta una representación esquemática de este principio de funcionamiento. Inicialmente, la bobina A se energiza y el rotor se alinea con el campo magnético generado por esta. Cuando se energiza la bobina B, el rotor experimenta un giro de 60° en sentido horario para alinearse con el nuevo campo magnético. El mismo fenómeno se repite al energizar la bobina C. En las imágenes, los colores de los dientes del estator indican la dirección del campo magnético producido por el devanado del estator[24].

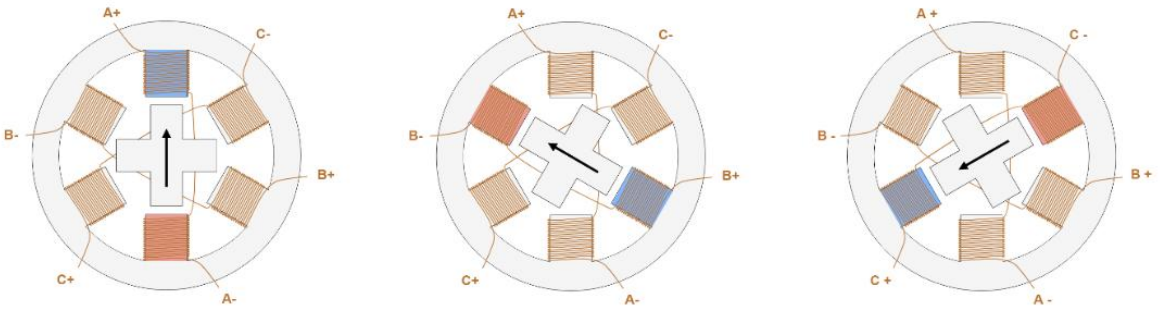


Figura 12: Escalones de motor paso a paso.

Generando un movimiento suave y la trasmisión de precisión en cada movimiento.

7.11.1.2 Motor de corriente continua

En una máquina CNC, el motor de corriente continua actúa como dispositivo de accionamiento principal o de tracción, encargado de transformar los pulsos eléctricos emitidos por la tarjeta controladora en desplazamientos mecánicos de precisión milimétrica y par torsional constante. A diferencia de su operación convencional, en la que únicamente gira de forma libre, dentro del sistema CNC este motor —frecuentemente integrado con un codificador o un servosistema— recibe una señal de voltaje controlada con exactitud para mover bandas, husillos y los ejes X, Y, Z, o para impulsar el cabezal de corte (spindle) a altas revoluciones. Esta fuerza magnética se traduce en el empuje requerido para desplazar la herramienta de fresado con la velocidad de avance F y la fuerza necesaria para desbastar la placa de circuito impreso sin desviaciones del orden de un micrómetro[21].



Figura 13: Motor de corriente continua de la maquina cnc.

7.11.2 Placa de control o Tarjeta controladora

Una placa de control, también denominada tarjeta controladora, constituye el núcleo electrónico de un sistema; recibe datos, procesa las instrucciones procedentes del software y emite señales eléctricas precisas para coordinar el movimiento y la operación de componentes físicos tales como motores, dispositivos de iluminación y sensores. En función de la aplicación específica —como impresión 3D, robótica o sistemas de automatización—, la selección de la tarjeta controladora debe efectuarse de acuerdo con los requerimientos particulares del proyecto.

- **Tarjeta GRBL 1.1**

  La placa GRBL 1.1 es una tarjeta de control electrónico concebida para la operación de máquinas CNC de pequeña escala, como grabadores láser y fresadoras de tres ejes (X, Y, Z), cuya función principal consiste en traducir los comandos de código G enviados desde una computadora en movimientos físicos de alta precisión. Este módulo, basado en un firmware de código abierto y alimentado generalmente con tensiones de 12 V a 24 V, centraliza las conexiones de los motores paso a paso, del husillo de corte y de los interruptores de seguridad, ofreciendo una solución económica, eficiente y ampliamente compatible con software de control libre como Candle o Universal Gcode Sender.

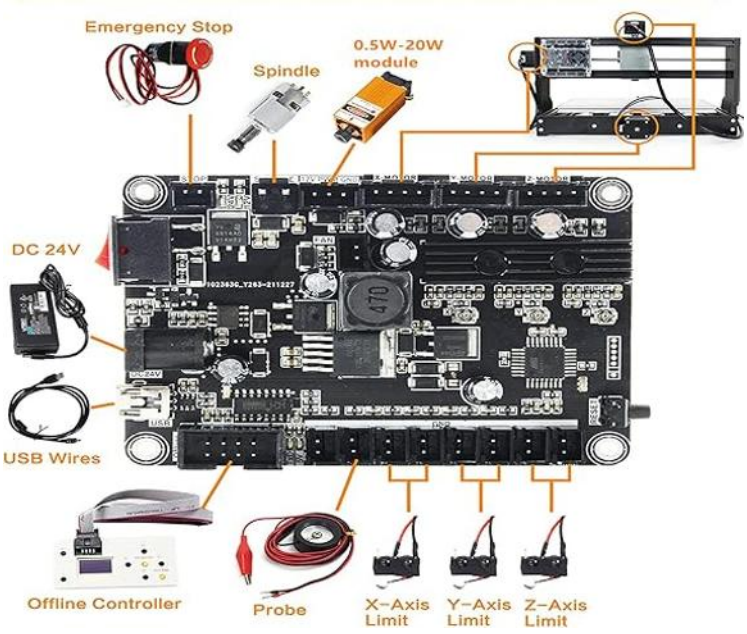


Figura 14: Tarjeta GRBL 1.1 y distribución de conexiones de control

Fuente: Ficha técnica del fabricante. Identificación de alimentación, USB, límites de ejes, sonda, husillo y parada de emergencia

7.11.3 Flujo de trabajo de software en CNC: CAD, CAM y Control

La integración del software en el proceso de mecanizado CNC se estructura como un flujo de trabajo digital continuo que convierte una definición geométrica en una pieza material mediante la operación coordinada de tres programas especializados. En primer lugar, el software CAD se encarga del modelado digital de la geometría del componente;

posteriormente, el software CAM transforma dicho modelo en trayectorias de corte y en instrucciones ejecutables, materializadas en Código G; finalmente, el software controlador interpreta estas órdenes en tiempo real y permite dirigir con elevada precisión los desplazamientos mecánicos, las velocidades de avance y las fuerzas aplicadas por la máquina herramienta.

7.11.3.1 Software Proteus

Proteus constituye una plataforma de software orientada al desarrollo integral de proyectos electrónicos, ya que abarca todas las fases del proceso: diseño del esquema electrónico, programación del software, diseño y construcción de la placa de circuito impreso, simulación conjunta del sistema, depuración de errores, documentación y fabricación[25].

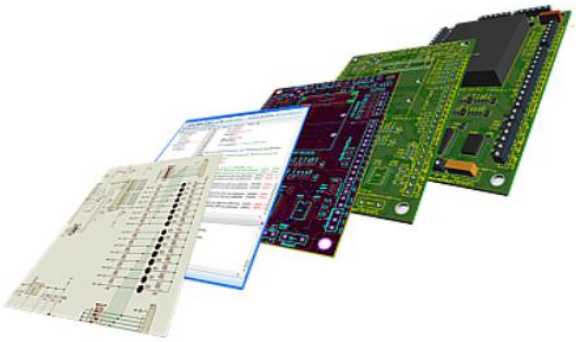


Figura 15: Proceso para realizar un circuito impreso [25].

Proteus VSM es un sistema de diseño electrónico basado en la Simulación analógica, digital o mixta de circuitos, que brinda la posibilidad de interacción con muchos de los elementos que integran el circuito. Incluye componentes animados para la visualización de su comportamiento en tiempo real, además de un completo sistema de generación y análisis de señales. También cuenta con un módulo para el diseño de circuitos impresos. El programa cuenta con dos partes o componentes principales. Uno de ellos es el módulo ISIS, que es donde vamos a dibujar los

diagramas de los circuitos electrónicos y, también, desde donde efectuaremos las simulaciones[26].



Figura 16: Proteus desarrollo de circuitos desde el diseño del circuito eléctrico hasta la prueba de funcionamiento [26].

7.11.3.2 Software FlatCam

El fresado de placas de circuito impreso, denominado asimismo grabado mecánico, constituye en la actualidad el proceso de prototipado de PCB más rápido, limpio, económico y de alto rendimiento. FlatCAM es un software que permite transferir los diseños generados a un enrutador CNC. Es capaz de importar archivos en formato Gerber, Excellon o G-code, así como de editarlos o crearlos desde cero y de exportar código G como resultado. El enrutado de aislamiento constituye una de las múltiples tareas para las cuales FlatCAM resulta idóneo. Se trata de una herramienta de código abierto, desarrollada en Python, que opera de manera estable en la mayoría de las plataformas[27].

- Conceptos básicos
  - **Fuentes de Datos**

    Entre los formatos de archivo de origen admitidos por el sistema se encuentran los siguientes: el formato Gerber, que describe de manera general las capas de cobre de un circuito impreso; el formato Excellon,

el cual contiene la información relativa a las perforaciones, sus diámetros y coordenadas; el formato G-Code, que reúne las instrucciones de corte y perforación destinadas a la máquina CNC; y el formato SVG ("Scalable Vector Graphics"), correspondiente a gráficos vectoriales escalables. La carga de estos archivos se realiza mediante las opciones File → Open Gerber..., File → Open Excellon..., File → Open G-Code... o File → Import SVG..., según el formato que se desee incorporar. Los objetos generados a partir de dichos archivos se agregan de manera automática al proyecto en curso[27].

- **Objetos y Operaciones**

  En FlatCAM se distinguen cuatro tipos de datos u objetos: Gerber, Excellon, Geometry (Geometría) y CNC Job (Trabajo CNC). Los objetos Gerber, Excellon y CNC Job se generan directamente a partir de los archivos Gerber, Excellon o G-Code correspondientes. Por su parte, los objetos Geometry funcionan como una fase intermedia destinada a la manipulación de datos; pueden obtenerse como resultado de diversas operaciones o directamente desde archivos SVG. El diagrama incluido a continuación ilustra las relaciones existentes entre los archivos y los objetos. Las flechas que vinculan ambos elementos representan un subconjunto de las operaciones posibles dentro de FlatCAM[27].

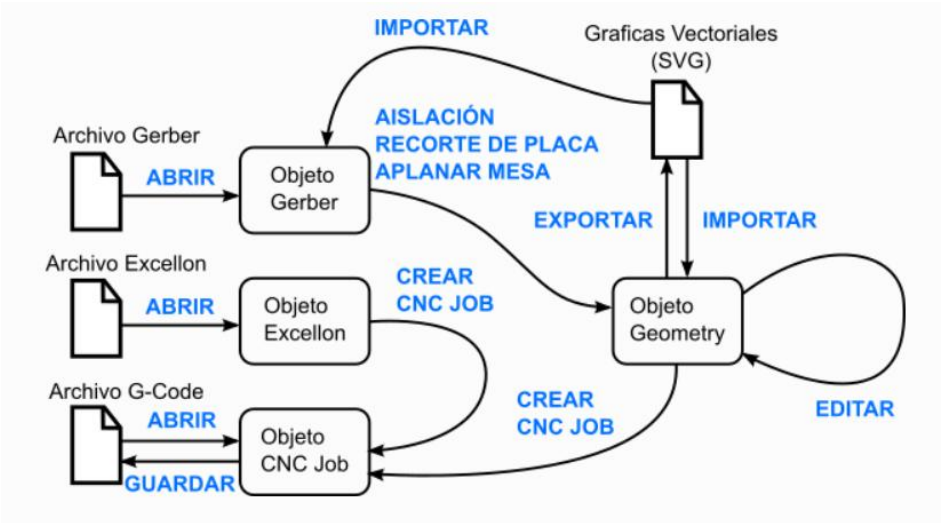


Figura 17: Flujo de operaciones del software FlatCAM

- **Formato**

  El formato Gerber define geometrías poligonales, es decir, figuras que delimitan áreas. Habitualmente, estas figuras representan regiones de cobre correspondientes a una capa específica de una placa de circuito impreso. Asimismo, el formato se emplea para la definición de máscaras de soldadura, pasta de soldadura y serigrafía.

  A continuación, se presenta un archivo Gerber de breve extensión a modo de ejemplo:

```
G04 This line is a comment an is ignored.*
G04 Coordinate format specification:*
%FSLAX25Y25*%
G04 Set units to inches:*
%MOIN%
G04 Define an aperture:*
%ADD10C,0.100*%
G04 Change polarity to DARK:*
%LPD*%
G04 Select the the previously defined
aperture:*
D10*
G04 Set interpolation mode to linear:*
G01*
G04 Move to (0, 0) without drawing:*
X0Y0D02*
G04 Draw to (5, 5) using aperture 10:*
X500000Y500000D01*
G04 Enf of file:*
M02*
```

- **Soporte**

  FlatCAM (versión 8.993 Beta) admite de forma completa el formato Gerber, con las siguientes excepciones:

  - ❖ No se contemplan las perforaciones en aperturas estándar.
  - ❖ La interpolación se ejecuta siempre mediante aperturas circulares, incluso cuando se especifica una apertura no circular. En dichos casos, FlatCAM determina un tamaño equivalente a partir de las dimensiones de la apertura y emplea este valor como diámetro de una apertura circular. Esta restricción no afecta a la gran mayoría de archivos Gerber orientados a circuitos impresos ni incide en las operaciones de destello (flashing).

- El comando de paso y repetición (Step and Repeat, SR) no está soportado.



Figura 18: Interfaz de carga del FlatCAM

7.11.3.3 Software Candle GRBL

Candle GRBL es un software de uso libre destinado al control básico de máquinas CNC. Su operación sencilla lo hace especialmente adecuado para usuarios principiantes o con escasa experiencia en sistemas de control numérico[28].

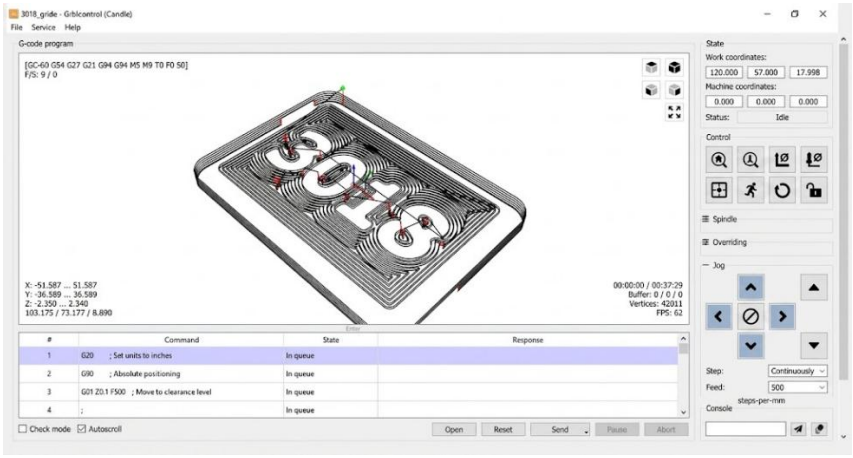


Figura 19: Ventana de trabajo software Candle GRBL

El software integra un visualizador de código G y dispone exclusivamente de las funciones esenciales requeridas para la ejecución de programas escritos en dicho lenguaje. Aunque la presencia de un conjunto reducido de funciones puede representar una limitación, contribuye a disminuir de manera significativa la sobrecarga de información que suele presentarse cuando el usuario aún no está familiarizado con el mecanizado CNC[28].

Tabla 3. Tabla principal de Candle GRBL

Control / Sección	**Función**	**Descripción / Uso**
Puerto serie / Baudios	Conexión	Selecciona el puerto COM de la placa y la velocidad, normalmente 115200.
Conectar	Conexión	Abre la comunicación serie con GRBL.
Desconectar	Conexión	Cierra la comunicación serie.
Abrir archivo	Archivo	Carga un archivo G-code (.nc, .gcode, .tap, .txt, etc.) en el visualizador.
Enviar / Iniciar	Archivo	Envía el G-code cargado a GRBL y comienza el mecanizado.
Pausar	Control de trabajo	Envía (feed hold). Detiene el avance sin perder coordenadas.
Reanudar	Control de trabajo	Envía para continuar después de una pausa.
Abortar / Stop	Control de trabajo	Interrumpe el trabajo inmediatamente y detiene GRBL.
Reset	Control de trabajo	Reinicia GRBL, limpia cola de comandos y alarmas.
Unlock	Control de trabajo	Envía para quitar la alarma y desbloquear movimientos.
Home	Control de trabajo	Ejecuta el ciclo de homing para buscar origen máquina.
Check Mode	Verificación	Activa el modo chequeo: ejecuta el G-code sin mover motores ni encender husillo.
Control / Sección	**Función**	**Descripción / Uso**
Jog X/Y/Z +/−	Movimiento manual	Mueve manualmente cada eje en dirección positiva o negativa.
Incremento de paso	Movimiento manual	Define la distancia por pulsación: 0,01 / 0,1 / 1 / 10 / 100 mm, etc.
Velocidad de jog	Movimiento manual	Ajusta la velocidad de los movimientos manuales.
MDI	Entrada manual	Permite escribir y ejecutar comandos G-code o comandos GRBL directamente.
DRO	Visualización	Muestras coordenadas de máquina y de trabajo en tiempo real.
Cero X / Y / Z	Coordenadas	Establece el origen de trabajo actual en el eje seleccionado.
Override de avance	Control de velocidad	Ajusta el porcentaje de la velocidad de avance programada.
Override de husillo	Control de velocidad	Ajusta el porcentaje de la velocidad del husillo programada.
Spindle On/Off	Husillo	Enciende o apaga el husillo manualmente.
Refrigerante On/Off	Refrigerante	Activa o desactiva el refrigerante/nebulizador.

Visualizador de G-code	Visualización	Muestra la trayectoria del archivo y el progreso del mecanizado.
Consola	Diagnóstico	Muestra respuestas de GRBL: errores, alarmas, configuración, etc.
Estado	Diagnóstico	Indica el estado actual de GRBL: Idle, Run, Hold, Alarm, etc.
Configuración GRBL	Configuración	Permite ver o editar parámetros, etc.

7.11.4 Algoritmos de control y espacios de ejecución

Para que la máquina trabaje de forma coordinada, los algoritmos de control se encargan de organizar el flujo de datos de manera ordenada. Con el objetivo de mantener la velocidad y la estabilidad del equipo, estos bloques de control se separan en tres niveles o espacios de trabajo[21].

- Espacio de usuario: es el entorno base donde corre el sistema operativo de la computadora, como Windows. Aquí se ejecutan las tareas comunes de interfaz, sin opciones avanzadas de priorización[17].
- Espacio de baja latencia (tiempo real suave): en este nivel intermedio se desarrollan tareas que deben cumplir con un tiempo promedio de respuesta. Se puede intervenir el planificador de tareas y ajustar prioridades para que todo funcione con fluidez[29].
- Espacio de tiempo real estricto (hard real time): es el nivel más crítico del sistema. Aquí se ejecutan tareas que deben cumplir rigurosamente condiciones de predictibilidad y velocidad, sin permitir ninguna desviación de los parámetros durante todo el tiempo de operación[13].

7.11.5 El intérprete de código G y flujo de datos

El código G es el estándar mundial para el control de maquinaria CNC. La arquitectura lógica del sistema incluye un algoritmo intérprete capaz de leer este lenguaje, donde se encuentra toda la información geométrica, las velocidades de avance y la potencia exacta necesaria para el corte. Este proceso de interpretación se divide en dos etapas: Lectura y evaluación: primero se leen las funciones programadas junto con la información adicional sobre las limitaciones impuestas para los trazos del diseño[13].

Generación de trayectorias: después, la información procesada se convierte en “funciones canónicas” y se entrega al siguiente bloque lógico. A partir de ahí, los datos

pasan por el planificador de rutas, la cinemática inversa y los ajustes necesarios, hasta llegar al generador de pasos y PWM, que es el encargado de dictar el movimiento final de los motores[22].

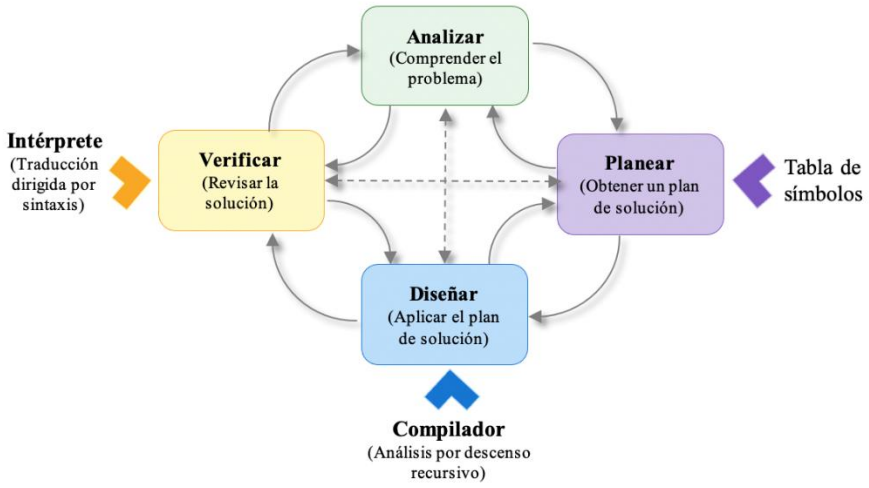


Figura 20: Diagrama de interprete.

Para entender cómo se controla la máquina, conviene imaginar que el sistema trabaja en tres niveles con distinto grado de exigencia temporal. El primero es el entorno normal de la computadora, donde la interfaz y el sistema operativo funcionan sin urgencia. El segundo nivel ya exige cierta fluidez, pero tolera pequeñas demoras. El tercero, en cambio, es el más crítico: allí se ejecutan las órdenes de movimiento y de potencia, y cualquier retraso podría arruinar la pieza. Por eso, las tareas de este nivel deben ocurrir siempre en el instante preciso. En cuanto al código G, el sistema lo interpreta como si leyera una receta muy detallada: primero comprende qué trayectorias debe seguir, a qué velocidad y con cuánta potencia; luego traduce esa información a órdenes simples para los motores. Esa traducción no mueve nada por sí sola, sino que entrega los datos a un planificador de rutas y, finalmente, a un generador de pulsos que es quien realmente controla el movimiento[15].

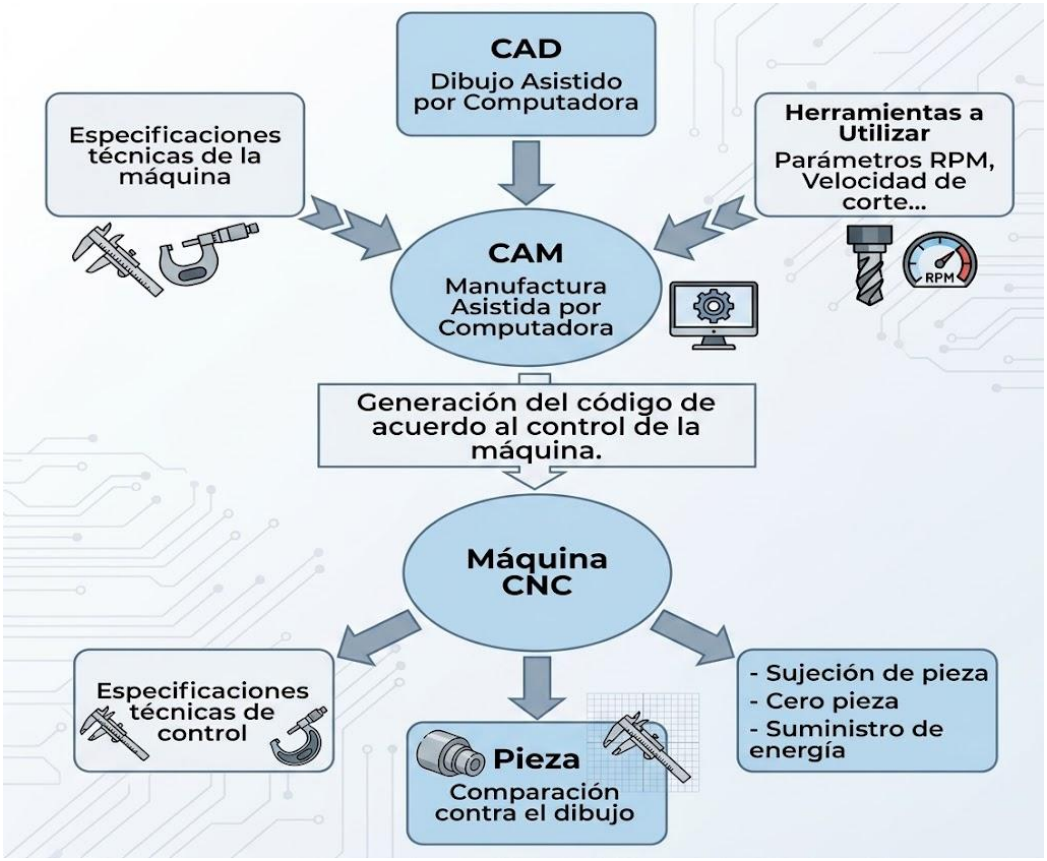


Figura 21: Generación de código de acuerdo al control de la máquina.

7.11.6 Tecnología de actuación y control

Un servomotor es un dispositivo que combina un motor de corriente continua con engranajes para mover su eje hasta un ángulo determinado y mantenerlo estable en esa posición. Transforma la energía eléctrica en movimiento gracias a los campos magnéticos, y por eso es muy útil en la CNC, porque entrega la fuerza necesaria para cada movimiento. Su sistema de control trabaja al mismo tiempo con la velocidad y la posición, lo que permite acelerar o frenar según la tarea y mantener posturas con firmeza. En la Figura 20 se muestra el esquema de control, donde se observa un lazo cerrado de retroalimentación: el sistema verifica continuamente la posición real y la corrige para que coincida con la deseada. Entre sus ventajas destacan un comportamiento lineal, tiempos de respuesta muy cortos, velocidades de 1000 a 3000 rpm y un par elevado en comparación con su inercia, lo que lo hace ideal para movimientos punto a punto con aceleraciones rápidas. Normalmente se conecta mediante tres cables: dos para la alimentación, positivo y negativo, y uno para la señal PWM[3].

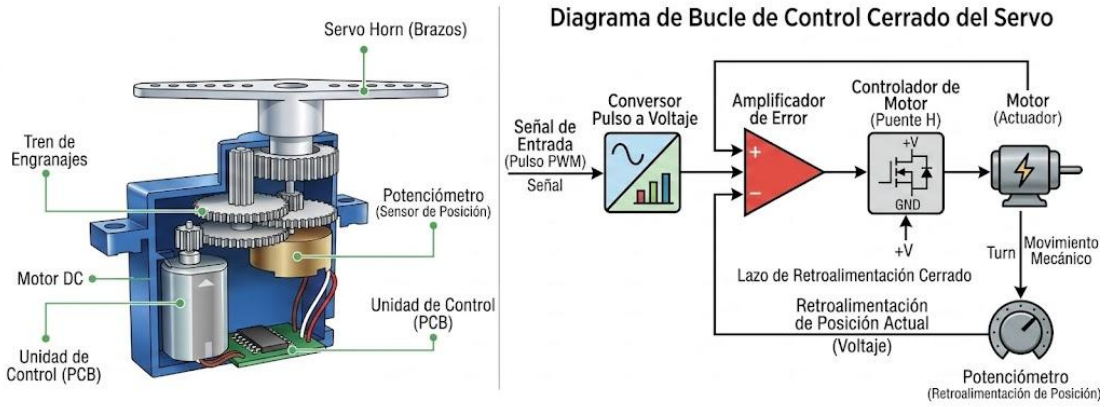


Figura 22: Esquema de motor DC y diagrama de control[3].

7.12 Herramientas de corte

7.12.1 Herramienta de desbaste

Para realizar el desbaste, se sugiere emplear las fresas indicadas en la tabla 4. El ángulo de inclinación de cada fresa es lo que define el tipo de tecnología que necesita la tarjeta electrónica.

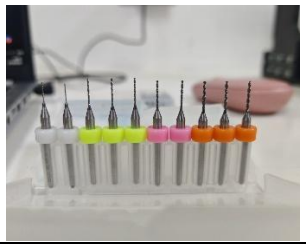
Tabla 4. Fresas tipo V de 0.1mm, 30°

Fresa	Forma física	Descripción
Tipo V 0.1mm de 30° de Carburo		Fresa para mecanizado de PCB, con Características THT (Through-Hole Technology)

7.12.2 Herramienta de perforación

Para perforar, se aconseja usar las brocas de la tabla 5, ya que el diámetro de cada una está definido según el pad que se va a fabricar, y ese pad depende de los componentes electrónicos que llevará el circuito.

Tabla 5. Fresas para perforado.

Brocas	Forma física	Descripción
Brocas de carburo de tungsteno de 0.3 a 1.2 mm		Brocas para perforar la PCB, con longitudes de trabajo de 38mm y un diámetro del vástago approx 3.175mm.

7.12.3 Herramienta de perfil

Para cortar especialmente los bordes de la placa, se recomienda usar las fresas indicadas en la tabla, porque su diámetro es el adecuado para atravesar el espesor de la placa de cobre.

Tabla 6. Fresas de perfilado

Fresa	Forma física	Descripción
Fresas recubiertas de Titanio de 1mm a 3mm		Fresas para perforado de PCB, con longitudes de trabajo de 7.5mm hasta 10.5mm.

7.13 Estación de soldadura y retrabajo electrónico

La soldadura electrónica forma parte del ensamblaje de placas de circuito impreso, ya que permite crear una unión entre los terminales de los componentes y las superficies conductoras de la PCB. Este proceso se realiza mediante un material metálico de aporte que, al recibir suficiente calor, se funde y forma una conexión eléctrica y mecánica entre las partes[30].

Dentro de los trabajos electrónicos existen diferentes equipos destinados a este proceso. Entre los más comunes se encuentran los cautines eléctricos, las estaciones de soldadura con control de temperatura y las estaciones de retrabajo con aire caliente. Estos equipos se emplean tanto en el montaje inicial de componentes como en trabajos de mantenimiento, sustitución o corrección de elementos electrónicos [31].

Las estaciones modernas permiten un mejor control de las condiciones de trabajo, especialmente de la temperatura. En algunos equipos también se encuentra disponible un

sistema de aire caliente, el cual facilita el trabajo sobre componentes de montaje superficial y zonas donde el contacto directo de una punta resulta más complicado [31].



Figura 23. Estación de soldadura y retrabajo electrónico

7.13.1 Soldadura electrónica

La soldadura electrónica consiste en la unión de dos superficies metálicas mediante un material de aporte denominado soldadura. Este material presenta un punto de fusión menor que las partes principales que se desean unir, por lo que puede fundirse sin llegar a derretir los terminales del componente ni las pistas de la placa.

En una PCB, la unión soldada cumple dos funciones. La primera corresponde a la conexión eléctrica entre el componente y el circuito, mientras que la segunda aporta cierta sujeción mecánica al elemento colocado sobre la placa.

La calidad de esta unión depende de varios factores, entre ellos la temperatura de la herramienta, el tipo de aleación utilizada, el estado de las superficies, el tipo de flux y la transferencia de calor. Una temperatura mal controlada puede generar problemas tanto en la soldadura como en los componentes electrónicos [32].

El control térmico resulta importante porque una herramienta con buena recuperación de temperatura mantiene condiciones más estables durante el contacto con la unión. Esto reduce la necesidad de trabajar con temperaturas demasiado elevadas y disminuye el efecto térmico sobre los componentes [33].

7.13.2 Material de soldadura

El material de aporte utilizado en electrónica está formado por una aleación metálica que se funde durante el proceso y posteriormente se solidifica sobre la unión. Existen diferentes tipos de aleaciones, cada una con temperaturas de fusión y características particulares.

Actualmente se encuentran soldaduras con plomo y soldaduras libres de plomo. Dentro de las alternativas libres de plomo se utilizan aleaciones basadas en estaño, plata y cobre, conocidas comúnmente como aleaciones SAC. La temperatura de trabajo cambia según la composición de la aleación [32].

Kester señala que, en aplicaciones manuales con aleaciones libres de plomo, las temperaturas de punta utilizadas con frecuencia se encuentran aproximadamente entre 371 °C y 400 °C, mientras que algunas soldaduras con otras composiciones pueden trabajar con valores menores [3]. Estos valores corresponden a condiciones generales de soldadura y pueden cambiar según el equipo, la geometría de la punta y el componente.

7.13.3 Flux para soldadura

El flux es un material utilizado como apoyo durante la soldadura electrónica. Su función principal se relaciona con la limpieza de las superficies y la mejora del contacto entre la soldadura fundida y los metales que forman la unión.

Durante el calentamiento pueden aparecer capas de óxido sobre los terminales o las superficies conductoras. Estas capas dificultan una buena distribución de la soldadura. El flux ayuda a reducir este problema y favorece una mejor humectación de la zona de trabajo.

Existen diferentes tipos de flux según su composición química y la aplicación prevista. Algunos se encuentran incorporados dentro del propio hilo de soldadura, mientras que otros se presentan en forma líquida o mediante aplicadores tipo lápiz. Kester dispone, por ejemplo, de flux destinados tanto a trabajos convencionales como a retrabajo de ensamblajes de montaje superficial.



Figura 24. Presentaciones comunes de flux para soldadura electrónica.[34]

7.13.4 Tecnología de orificio pasante THT

La tecnología THT (Through-Hole Technology) corresponde a un método de montaje donde los terminales de los componentes atraviesan los orificios presentes en la placa de circuito impreso. Una vez insertados, estos terminales quedan unidos a las zonas conductoras mediante soldadura.

Esta tecnología mantiene una presencia importante en componentes que necesitan una buena resistencia mecánica, especialmente conectores y elementos que reciben esfuerzos durante su uso [35].

Una de sus características principales es la necesidad de perforaciones en la PCB. Esto genera una diferencia clara frente al montaje superficial, ya que la placa debe disponer de orificios con posiciones y dimensiones compatibles con los terminales de los componentes.

Los componentes THT suelen presentar dimensiones mayores y ocupan espacio en ambas caras de la PCB. Sin embargo, su tamaño facilita la manipulación manual y su uso en prácticas académicas y prototipos [30].

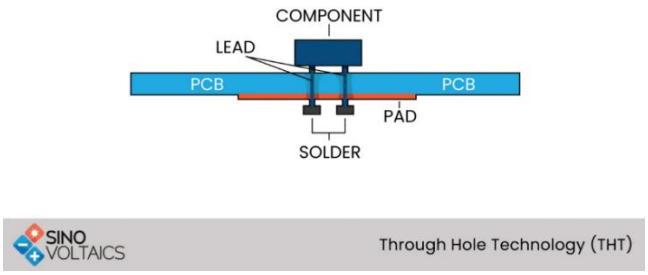


Figura 25. Representación de la tecnología de orificio pasante THT.

7.13.5 Tecnología de montaje superficial SMT

La tecnología SMT (Surface-Mount Technology) corresponde a un método donde los componentes electrónicos quedan ubicados directamente sobre la superficie de la PCB. Estos dispositivos reciben el nombre de SMD (Surface-Mount Devices).

A diferencia de la tecnología THT, la mayoría de los componentes SMT no necesita terminales que atraviesen completamente la placa. Esta característica permite una mayor densidad de componentes y un mejor aprovechamiento del espacio disponible [30].

Los dispositivos SMD suelen tener dimensiones reducidas, por lo que su manipulación requiere mayor precisión. Además, la inspección de sus terminales puede resultar más difícil a simple vista, especialmente cuando se trabaja con encapsulados pequeños.

La tecnología SMT se encuentra ampliamente utilizada en equipos electrónicos modernos debido a la posibilidad de reducir el tamaño de las placas y aumentar la cantidad de componentes instalados.

Característica	**THT**	**SMT**
Ubicación del componente	Atraviesa la placa	Sobre la superficie
Necesidad de perforación	Sí	Generalmente no
Tamaño de componentes	Mayor	Menor
Densidad de montaje	Menor	Mayor
Manipulación manual	Más sencilla	Requiere mayor precisión
Resistencia mecánica	Alta en varios tipos de componentes	Depende del encapsulado y de la unión
Uso frecuente	Conectores, prototipos y componentes robustos	Equipos electrónicos compactos

Tabla 7. Comparación general entre tecnologías THT y SMT[30], [35]

7.13.6 Estación de soldadura

Una estación de soldadura es un equipo electrónico que controla la energía suministrada al cautín y mantiene la temperatura de trabajo dentro de un valor establecido. A diferencia de un cautín básico conectado directamente a la red eléctrica, una estación permite mayor control sobre las condiciones térmicas.

Este control resulta importante porque la temperatura de la punta disminuye cuando entra en contacto con una superficie que absorbe calor. Las estaciones con buena recuperación térmica compensan esta pérdida y mantienen un comportamiento más estable durante el proceso [33].

Además del control de temperatura, algunos equipos permiten el uso de diferentes tipos de puntas. La selección de la punta depende del tamaño de la unión, la geometría del componente y la cantidad de calor requerida.



Figura 26. Principales partes de una estación de soldadura.

7.13.7 Cautín eléctrico

El cautín eléctrico es la herramienta que transmite calor hacia la zona donde se forma la unión soldada. Está compuesto principalmente por un elemento calefactor, una punta metálica, un mango aislado y el sistema de alimentación.

La punta representa la zona de contacto directo con la unión. Su forma y tamaño influyen en la transferencia térmica. Una punta demasiado pequeña puede perder temperatura con rapidez frente a superficies grandes, mientras que una punta adecuada mejora el paso del calor hacia la unión.

El mantenimiento de la punta también tiene importancia. La superficie debe conservarse en condiciones que permitan una transferencia térmica adecuada. HAKKO señala que el control de la temperatura de la punta y su correcto mantenimiento forman parte de las revisiones comunes de una estación de soldadura [36].

Elemento	**Función**
Punta	Transmite calor hacia la unión
Elemento calefactor	Genera la energía térmica
Sensor de temperatura	Permite el control térmico en equipos regulados
Mango	Aísla al usuario de la zona caliente
Cable	Lleva alimentación y señales hacia el cautín
Soporte	Mantiene la herramienta en una posición segura

Tabla 8. Elementos principales de un cautín eléctrico[33], [36]

7.13.8 Estación de aire caliente

Una estación de aire caliente es un equipo que genera un flujo de aire con temperatura controlada. Este aire sale mediante una boquilla y se dirige hacia una zona determinada de la placa electrónica.

Su uso se encuentra principalmente relacionado con los componentes SMD y con las actividades de retrabajo. A diferencia del cautín, el aire caliente transmite energía térmica sin contacto directo con los terminales del componente.

Los equipos de este tipo permiten controlar parámetros como la temperatura y el flujo de aire. HAKKO indica que estas características facilitan trabajos de precisión sobre componentes pequeños y placas con alta densidad de montaje [31].

Un flujo de aire demasiado elevado puede desplazar componentes pequeños, mientras que una temperatura excesiva puede afectar la placa o los dispositivos cercanos. Por esta razón, ambos parámetros mantienen una relación importante con la calidad del retrabajo.

Parámetro	**Descripción**
Temperatura	Nivel térmico del aire
Flujo de aire	Cantidad de aire expulsado
Boquilla	Define el área donde se concentra el aire
Distancia de trabajo	Separación entre la boquilla y la PCB
Tiempo térmico	Periodo durante el cual actúa el calor

Tabla 9. Parámetros principales de una estación de aire caliente[31]



Figura 27. Funcionamiento de la pistola de aire caliente.

7.13.9 Retrabajo electrónico

El retrabajo electrónico comprende las operaciones relacionadas con la corrección, extracción o sustitución de componentes que ya se encuentran instalados sobre una PCB.

Estas acciones pueden aparecer cuando existe un componente defectuoso, una unión que necesita corrección o una modificación dentro del circuito. Dependiendo de la tecnología del componente, se emplean diferentes herramientas.

En componentes THT suele utilizarse una combinación de calor y sistemas de desoldado. En dispositivos SMD, las estaciones de aire caliente permiten una distribución térmica alrededor de varios terminales al mismo tiempo. Los fabricantes de equipos de retrabajo consideran la soldadura, desoldadura y reparación de componentes como funciones relacionadas dentro de una misma estación [37].

El retrabajo requiere cuidado debido a que una intervención incorrecta puede afectar pads, pistas o componentes cercanos. Por este motivo, la inspección posterior tiene una función importante dentro del control de calidad de la PCB.

7.13.10 Parámetros principales de la soldadura electrónica

La calidad de una unión soldada no depende únicamente de la temperatura. En el proceso intervienen diferentes parámetros que actúan de manera conjunta.

Entre los más importantes se encuentran la temperatura de la punta, la capacidad de transferencia térmica, el tipo de aleación, el flux utilizado, el tamaño del componente y el tiempo durante el cual se aplica calor.

Parámetro	**Influencia**
Temperatura	Determina la cantidad de calor disponible
Aleación	Define las condiciones de fusión
Flux	Favorece la humectación
Punta	Influye en la transferencia de calor
Tiempo	Define la exposición térmica
Área de contacto	Influye en la distribución del calor
Tipo de componente	Cambia las condiciones necesarias

Tabla 10. Parámetros generales que intervienen en la soldadura electrónica[32], [33]

7.13.11 Defectos comunes en las uniones soldadas

Durante el ensamblaje electrónico pueden aparecer defectos que afectan la calidad de una unión. Entre ellos se encuentran una cantidad insuficiente de soldadura, exceso de material, puentes entre terminales, mala humectación y daños alrededor de los pads.

Los criterios de aceptación de ensamblajes electrónicos se encuentran tratados en documentos técnicos de IPC, especialmente en normas relacionadas con la calidad de las uniones y el estado de los componentes [38].

Estos defectos pueden afectar la continuidad eléctrica o generar conexiones no deseadas entre diferentes puntos del circuito. En componentes pequeños, algunos problemas resultan difíciles de observar sin ayuda óptica, razón por la cual la inspección visual ampliada constituye un complemento importante del proceso.

Defecto	**Descripción general**
Soldadura insuficiente	Cantidad reducida de material en la unión
Exceso de soldadura	Acumulación innecesaria sobre el terminal
Puente de soldadura	Unión no deseada entre conductores
Mala humectación	El material no se distribuye correctamente
Pad dañado	Daño en la zona conductora de la PCB
Componente desplazado	Posición incorrecta respecto a los pads

Tabla 11. Defectos comunes en una unión soldada.[38]

7.14 Inspección de placas de circuito impreso

7.14.1 Inspección visual de PCB

La inspección visual corresponde a una revisión de la superficie de la placa y permite reconocer características físicas que pueden indicar una condición incorrecta. Entre los aspectos que suelen observarse se encuentran la forma de las pistas, separación entre conductores, estado de los pads, posición de los componentes y apariencia de las uniones soldadas.

En una PCB sin componentes, la revisión se concentra principalmente en las características del circuito conductor. Una pista interrumpida puede impedir el paso de corriente entre dos puntos, mientras que una unión no deseada entre conductores puede generar un camino eléctrico

distinto al establecido en el diseño. También pueden presentarse irregularidades alrededor de perforaciones o zonas donde parte del cobre fue eliminado de manera incorrecta.

Después del montaje de componentes, la inspección incluye la posición de los elementos y el estado de sus terminales. En este caso, una revisión visual ayuda a reconocer componentes desplazados, terminales sin conexión adecuada, exceso de soldadura o uniones entre puntos que deberían permanecer separados [39].

La inspección visual representa una primera forma de control de calidad; sin embargo, se encuentra limitada por el tamaño de los elementos observados y por la capacidad del operador para reconocer pequeños detalles. Por esta razón, en trabajos electrónicos se emplean herramientas ópticas que ofrecen un mayor nivel de aumento [40].

7.14.2 Defectos visibles en una PCB

Los defectos presentes en una placa de circuito impreso pueden aparecer durante diferentes etapas de fabricación y ensamblaje. Algunos se encuentran relacionados con el material conductor, mientras que otros se producen durante el montaje o la soldadura de los componentes.

Entre los defectos asociados a las pistas se encuentran cortes, reducción del ancho, cobre sobrante y uniones no previstas entre conductores. Este tipo de problemas puede modificar el recorrido eléctrico previsto para el circuito. La literatura sobre defectos de PCB también considera fallas como circuitos abiertos, cortocircuitos y alteraciones en las pistas como categorías importantes durante el control de placas electrónicas [41].

En el área de ensamblaje también pueden encontrarse problemas alrededor de pads, terminales y componentes. Una cantidad incorrecta de soldadura, un puente entre terminales o una posición inadecuada del componente puede afectar la conexión eléctrica y la estabilidad mecánica del conjunto [39].

Zona inspeccionada	**Defecto observable**	**Posible consecuencia**
Pistas	Corte o interrupción	Pérdida de continuidad
Pistas cercanas	Unión no deseada	Cortocircuito
Superficie de cobre	Material sobrante	Conexión entre zonas cercanas

Zona inspeccionada	Defecto observable	Posible consecuencia
Pads	Daño o desprendimiento	Mala conexión del componente
Perforaciones	Posición incorrecta	Dificultad durante el montaje
Componentes	Desplazamiento	Conexión incorrecta
Unión soldada	Soldadura insuficiente	Contacto eléctrico deficiente
Terminales	Puente de soldadura	Cortocircuito entre puntos

Tabla 12. Defectos que pueden identificarse durante la inspección visual de una PCB

7.14.3 Inspección óptica mediante microscopio digital

La inspección óptica emplea sistemas de aumento para observar detalles pequeños sobre la superficie de una placa electrónica. En comparación con una revisión directa, este método facilita la identificación de características que presentan dimensiones reducidas, especialmente alrededor de componentes de montaje superficial, terminales y pistas estrechas.

Los microscopios utilizados en electrónica permiten ampliar la zona de interés y mejorar la visualización de elementos pequeños. Los sistemas digitales incorporan una cámara que genera una imagen de la superficie observada y la muestra mediante una pantalla o monitor. Esta característica evita que la observación dependa únicamente de un ocular y facilita la revisión de zonas específicas de la placa.

En aplicaciones relacionadas con PCB, la microscopía se emplea en actividades de inspección, análisis de componentes y revisión de uniones. Los sistemas ópticos destinados a electrónica buscan principalmente una imagen clara, suficiente profundidad de campo y una distancia de trabajo que permita observar la placa sin dificultar su manipulación [40].

La iluminación también tiene importancia durante este proceso. Una cantidad adecuada de luz permite distinguir mejor los límites de las pistas, terminales y superficies metálicas. Por este motivo, muchos equipos digitales incorporan iluminación LED alrededor de la zona óptica.

7.14.4 Características generales de un microscopio digital

Un microscopio digital combina un sistema óptico, una cámara y un medio de visualización. Dependiendo del modelo, la imagen puede mostrarse directamente en una pantalla incorporada o enviarse hacia una computadora mediante una interfaz de comunicación.

Entre las características principales de este tipo de equipos se encuentran el nivel de aumento, resolución de imagen, distancia de trabajo, sistema de enfoque e iluminación. Estos parámetros

influyen en la facilidad con la que se pueden reconocer pequeñas irregularidades sobre una placa electrónica.

Como referencia de este tipo de tecnología, el microscopio digital DM7-Z33 dispone de una pantalla de 4,3 pulgadas, rueda de enfoque, iluminación LED, ranura para tarjeta de memoria e interfaz Tipo-C [42]. El equipo también dispone de modos para fotografía, video y reproducción de archivos, características comunes en sistemas digitales destinados al registro de imágenes.

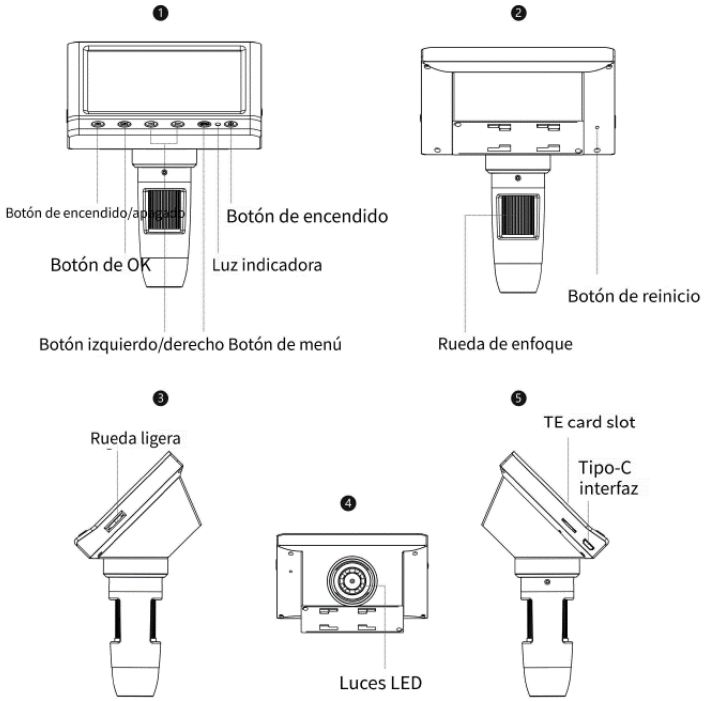


Figura 28. Elementos principales de un microscopio digital.

Característica	**Descripción**
Sistema óptico	Amplía la zona observada
Cámara digital	Convierte la imagen óptica en una señal digital
Pantalla	Permite visualizar la zona inspeccionada
Enfoque	Ajusta la nitidez de la imagen
Iluminación	Mejora la visibilidad de la superficie
Resolución	Determina el nivel de detalle de la imagen
Almacenamiento	Permite conservar fotografías o videos
Interfaz de datos	Facilita la conexión con otros dispositivos

Tabla 13. Características generales consideradas en un microscopio digital para inspección electrónica[40]

7.14.5 Sistemas de sujeción para placas de circuito impreso

Durante trabajos de inspección, soldadura o retrabajo, una placa puede requerir una posición estable. Los sistemas de sujeción para PCB son dispositivos mecánicos que mantienen la placa fija y reducen movimientos mientras se trabaja sobre componentes o zonas específicas.

Estos elementos normalmente cuentan con soportes regulables que se adaptan a diferentes dimensiones de placa. Algunos modelos también permiten cambios de posición o giro de la PCB, lo cual facilita el acceso a las dos caras del circuito.

Los sistemas profesionales de sujeción pueden incluir mecanismos de giro, abrazaderas y apoyos destinados a mantener componentes en su posición. Por ejemplo, Weller dispone de soportes de PCB con giro de 360°, abrazadera con resorte y brazo de apoyo para componentes, características que muestran la importancia de mantener una placa estable durante los trabajos electrónicos [43].

Además de la estabilidad, estos sistemas permiten mantener las manos libres para el uso de herramientas. Según el tipo de soporte, pueden incorporarse brazos flexibles, pinzas auxiliares o bases regulables que ayudan a sostener cables y piezas pequeñas.



Figura 29. Sistema ajustable para sujeción de placas de circuito impreso.

Elemento	**Función**
Base	Brinda estabilidad al conjunto
Soportes laterales	Mantienen la placa en posición
Sistema de ajuste	Adapta el soporte a diferentes tamaños de PCB
Pinzas	Sujetan elementos pequeños
Brazos flexibles	Permiten modificar la posición de las pinzas
Sistema de giro	Facilita el acceso a diferentes caras de la placa

Tabla 14. Elementos comunes en un sistema de sujeción para PCB

7.15 Verificación eléctrica de placas de circuito impreso

La verificación eléctrica de una placa de circuito impreso permite conocer si las conexiones presentes en la PCB mantienen el recorrido previsto por el diseño. Estas pruebas se aplican después de la fabricación o del ensamblaje y ayudan a identificar interrupciones, conexiones no deseadas o valores eléctricos fuera de las condiciones esperadas.

En una PCB, las pistas de cobre forman caminos conductores que unen diferentes puntos del circuito. Si una pista presenta una interrupción, la corriente no puede circular entre los puntos conectados. De forma contraria, cuando dos conductores que deberían permanecer separados presentan contacto eléctrico, puede aparecer un cortocircuito.

Dentro de los métodos de comprobación se encuentran las pruebas de continuidad, resistencia y aislamiento eléctrico. El estándar establece requisitos para las pruebas eléctricas de placas de circuito impreso sin componentes y contempla verificaciones relacionadas con continuidad y aislamiento entre redes eléctricas [44].

7.15.1 Prueba de continuidad

La continuidad eléctrica indica la existencia de un camino conductor completo entre dos puntos. Esta prueba permite conocer si una pista, conductor o unión mantiene una conexión sin interrupciones.

Un circuito cerrado presenta continuidad, mientras que un circuito abierto indica una interrupción en el recorrido eléctrico. La comprobación suele efectuarse mediante un

multímetro en la función de continuidad. El instrumento aplica una pequeña señal entre sus terminales y evalúa la resistencia existente entre los puntos de prueba [45].

En muchos multímetros, una resistencia muy baja produce una señal sonora, lo que permite identificar rápidamente una conexión eléctrica. Sin embargo, la señal acústica no sustituye el valor de resistencia cuando se necesita una evaluación con mayor detalle.

En una placa de circuito impreso, esta prueba puede emplearse para revisar pistas, terminales y conexiones que deberían estar unidas según el diseño.

7.15.2 Circuito abierto

Un circuito abierto aparece cuando existe una interrupción dentro de un camino conductor. Esta condición impide el paso normal de corriente entre dos puntos que deberían mantener conexión.

En una PCB, una condición de circuito abierto puede estar relacionada con una pista cortada, una perforación defectuosa, una unión soldada incompleta o un terminal que no mantiene contacto con su pad.

Durante una prueba de continuidad, un circuito abierto normalmente presenta una resistencia elevada o una indicación fuera de rango en el instrumento. Por esta razón, la medición de continuidad constituye una forma sencilla de localizar interrupciones en conexiones eléctricas [45].

7.15.3 Cortocircuito

Un cortocircuito corresponde a una conexión eléctrica no prevista entre dos puntos del circuito. Esta condición genera un camino de baja resistencia que puede modificar el comportamiento normal de la PCB.

En placas de circuito impreso, los cortocircuitos pueden aparecer por residuos conductores entre pistas, puentes de soldadura, exceso de cobre o contacto entre terminales cercanos.

La revisión de continuidad entre dos redes que deberían permanecer separadas constituye una comprobación básica para detectar este tipo de condición. Si el instrumento indica una resistencia muy baja entre puntos que no deberían tener conexión, existe la posibilidad de una unión eléctrica no deseada.

La detección de estas condiciones antes de aplicar alimentación al circuito ayuda a disminuir el riesgo de daños en componentes o elementos de la propia placa.

7.15.4 Medición de resistencia

La resistencia eléctrica representa la oposición que presenta un elemento al paso de corriente y se expresa en ohmios (Ω). Su medición puede realizarse mediante un multímetro digital u otro instrumento destinado a este propósito [46].

Cuando se mide resistencia, el circuito debe permanecer sin alimentación externa, ya que el propio multímetro genera una señal interna para obtener el valor correspondiente. Fluke recomienda retirar la alimentación antes de este tipo de mediciones [46].

En pistas conductoras de corta longitud se espera una resistencia relativamente baja. En cambio, entre conductores independientes se espera una resistencia considerablemente mayor. Los valores aceptables dependen del diseño, material, longitud y condiciones de la placa.

La resistencia de los cables de prueba también puede influir cuando se miden valores muy pequeños. Por esta razón, en trabajos que requieren mayor precisión pueden utilizarse métodos especiales de medición, como sistemas de cuatro conductores [47].

7.15.5 Aislamiento eléctrico entre conductores

El aislamiento eléctrico permite mantener separadas dos redes que no deben establecer contacto entre sí. En una PCB, este comportamiento depende de factores como la distancia entre pistas, el material utilizado, la presencia de humedad, suciedad o residuos conductores.

La prueba de aislamiento se diferencia de una simple comprobación de continuidad. Mientras la continuidad busca una conexión de baja resistencia, el aislamiento busca comprobar que existe una resistencia elevada entre conductores independientes.

Cuando contempla pruebas de continuidad y aislamiento resistivo para placas de circuito impreso sin componentes [44]. La norma establece distintos niveles y condiciones de prueba de acuerdo con las características del producto.

En verificaciones básicas puede comprobarse que no exista continuidad entre dos pistas independientes. Sin embargo, una prueba formal de resistencia de aislamiento puede requerir equipos específicos y niveles de tensión establecidos por normas o especificaciones técnicas.

7.15.6 Multímetro digital

El multímetro digital es un instrumento utilizado en trabajos eléctricos y electrónicos para medir diferentes magnitudes. Entre sus funciones más comunes se encuentran la medición de tensión,

corriente y resistencia. Muchos modelos también incluyen prueba de continuidad, diodos y otras funciones adicionales [48].

El instrumento dispone normalmente de una pantalla, selector de funciones, terminales de conexión y puntas de prueba. La función seleccionada determina el tipo de medición que realiza el equipo.

Para la comprobación de una PCB, las funciones de resistencia y continuidad tienen especial utilidad. La continuidad permite identificar caminos conductores completos, mientras que la medición de resistencia ofrece un valor numérico de la oposición eléctrica entre dos puntos.



Figura 30. Elementos principales de un multímetro digital.

Función	**Unidad o indicación**	**Aplicación general**
Continuidad	Señal sonora / resistencia	Identificación de conexiones
Resistencia	Ω	Medición de oposición eléctrica
Tensión DC	V DC	Comprobación de alimentación
Tensión AC	V AC	Medición de tensión alterna
Prueba de diodo	Caída de tensión	Revisión básica de diodos

Tabla 15. Funciones principales de un multímetro digital [44], [45], [46], [48]

Prueba	Qué se verifica	Resultado esperado
Continuidad	Existencia de conexión entre dos puntos	Baja resistencia o señal de continuidad
Circuito abierto	Interrupción de una pista o conexión	Resistencia elevada o ausencia de continuidad
Cortocircuito	Unión no deseada entre dos puntos	No debe existir continuidad entre redes independientes
Resistencia	Oposición eléctrica entre dos puntos	Valor acorde con el circuito
Aislamiento	Separación eléctrica entre conductores	Resistencia elevada entre puntos independientes
Tensión	Nivel eléctrico en un punto del circuito	Valor cercano al previsto en el diseño

Tabla 16. Pruebas eléctricas básicas aplicadas a una PCB[44], [48]

Tipo de revisión	Elementos evaluados	Instrumento principal	Tipo de defecto detectado
Inspección visual	Pistas, pads, componentes y soldadura	Microscopio digital	Defectos físicos visibles
Continuidad	Pistas y conexiones	Multímetro	Interrupciones
Cortocircuito	Redes independientes	Multímetro	Conexiones no deseadas
Resistencia	Conductores y componentes	Multímetro	Valores eléctricos anormales
Tensión	Puntos energizados del circuito	Multímetro	Niveles eléctricos incorrectos

Tabla 17. Diferencias entre inspección visual y verificación eléctrica de una PCB

8 PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS.

¿En qué medida la implementación de una estación integral para la fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso permite desarrollar de manera adecuada los procesos de mecanizado, montaje, soldadura, inspección y verificación eléctrica en el laboratorio de Electromecánica de la UTC Extensión La Maná?

9 METODOLOGÍA Y DISEÑOS EXPERIMENTAL.

El presente proyecto se desarrolla bajo un enfoque aplicado y experimental, debido a que contempla la integración de diferentes equipos y herramientas dentro de una estación destinada a la fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso. El trabajo parte de los fundamentos estudiados previamente y continúa con la aplicación práctica de los procesos necesarios para obtener una PCB dentro del laboratorio de Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná.

La metodología comprende varias etapas relacionadas entre sí. En primer lugar, se consideran las condiciones del espacio destinado a la estación y la distribución de los equipos. Después se realiza la configuración de la máquina CNC y de los programas que intervienen durante la preparación de los archivos. Finalmente, el proceso continúa con el mecanizado de una PCB de prueba, montaje de componentes, soldadura, inspección visual y comprobación eléctrica.

La fabricación de la placa se apoya en una máquina Genmitsu CNC Router 3018-PRO, la cual dispone de desplazamiento en los ejes X, Y y Z, motores paso a paso, husillo con portaherramientas ER11, placa de control y alimentación de 24 V. La comunicación con la computadora se establece mediante conexión USB, lo que permite el envío de las instrucciones necesarias para el mecanizado.

Para el desarrollo digital del circuito se utiliza Proteus 8.17, donde se realiza el esquema electrónico y el diseño de la placa de circuito impreso. El propio documento de fundamentación ya considera Proteus como una herramienta destinada al diseño, simulación y generación de PCB.

Una vez obtenido el diseño de la placa, los archivos Gerber y Excellon pasan a FlatCAM 8.993 Beta. Este programa permite trabajar con dichos formatos y generar las trayectorias correspondientes al mecanizado, además del código G que posteriormente interpreta la máquina CNC.

El control de la máquina se realiza mediante Candle GRBL, software que permite establecer la comunicación con la tarjeta de control, cargar el archivo de código G y ejecutar las instrucciones de mecanizado. Dentro de sus funciones se encuentran la selección del puerto de comunicación, conexión con GRBL, carga del archivo, inicio, pausa, reanudación y parada del proceso.

La validación experimental se desarrolla mediante una placa de circuito impreso de prueba, la cual pasa por las diferentes etapas que conforman la estación integral. Durante el mecanizado se consideran aspectos como el ancho de las pistas, diámetro de las perforaciones y tiempo de manufactura. Después del montaje y soldadura se realiza una inspección ampliada de la superficie y, posteriormente, una comprobación eléctrica mediante multímetro.

Los valores, fotografías y observaciones obtenidos durante estas etapas servirán como evidencia del funcionamiento de la estación. Los resultados medidos no se analizan dentro de este capítulo, ya que su comparación y discusión corresponden al apartado de análisis de resultados.

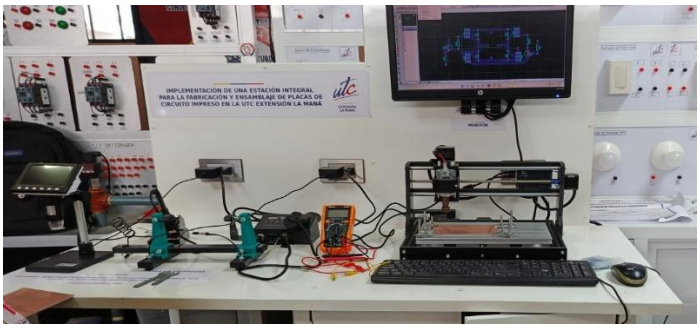


Figura 31. Flujo general para la fabricación y ensamblaje de una PCB mediante la estación integral.

9.1 Fases de la metodología

Para el desarrollo del proyecto se establecieron cinco fases metodológicas organizadas de forma secuencial. Cada fase corresponde a una parte importante del proceso, desde la definición del espacio de trabajo hasta la comprobación final de la PCB. Esta organización permite mantener un orden durante la implementación y relacionar las actividades desarrolladas con los objetivos establecidos en el proyecto.

La tesis finalizada utiliza esta misma forma de organización, donde las fases se resumen inicialmente mediante una tabla que contiene la denominación, actividades principales y resultado de cada etapa.

Fase	Denominación	Actividades principales	Resultado
1	Escenario de implementación	Identificación del espacio de trabajo, condiciones eléctricas, iluminación, ventilación, seguridad y ubicación disponible para los equipos	Área definida para la implementación y operación de la estación integral
2	Integración y acondicionamiento de la estación	Distribución de la CNC, computadora, estación de soldadura, microscopio digital, sujetador de PCB, multímetro y herramientas auxiliares	Estación integral organizada con los equipos necesarios para las diferentes etapas del proceso
3	Configuración y puesta en funcionamiento de la CNC	Conexión de la Genmitsu 3018-PRO, instalación del controlador de comunicación, configuración de Candle GRBL, revisión de los ejes X, Y y Z, comprobación del husillo y establecimiento del origen de trabajo	Máquina CNC conectada, configurada y disponible para el mecanizado
4	Preparación y fabricación de la PCB de prueba	Diseño del circuito en Proteus 8.17, generación de archivos Gerber y Excellon, procesamiento mediante FlatCAM 8.993 Beta, generación del código G, fijación de la placa, fresado, perforación y corte	PCB mecanizada y preparada para el montaje de los componentes
5	Ensamblaje y validación experimental de la estación	Montaje de componentes, soldadura, inspección óptica, pruebas de continuidad, comprobación de cortocircuitos y prueba funcional del circuito	Proceso integral de fabricación y ensamblaje evaluado mediante una PCB de prueba

Tabla 18. Fases metodológicas desarrolladas en el proyecto

9.1.1 Fase 1: Escenario de implementación

El proyecto se desarrolla en el Laboratorio de Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná. Este espacio permite realizar actividades prácticas relacionadas con sistemas eléctricos, electrónicos y electromecánicos, por lo cual resulta adecuado para la incorporación de una estación destinada a la fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso.

Para la implementación se destinó un área específica dentro del laboratorio, en la cual se ubicaron los equipos principales y las herramientas necesarias para las diferentes etapas del proceso. La distribución del espacio considera la presencia de la máquina CNC, computadora, estación de soldadura, sistema de aire caliente, microscopio digital, sujetador de PCB, multímetro y herramientas auxiliares.

El área de trabajo debe mantener condiciones que permitan una operación estable y segura de los equipos. En el caso de la CNC Genmitsu 3018-PRO, el fabricante indica que la máquina debe mantenerse sobre una superficie estable, en un espacio interior y con ventilación adecuada. También señala la importancia de contar con acceso libre al sistema de parada de emergencia y evitar el contacto con el husillo o la zona de trabajo mientras la máquina se encuentra en funcionamiento.

La organización del espacio también busca separar las actividades de mecanizado de aquellas relacionadas con el ensamblaje electrónico. Durante el funcionamiento de la CNC pueden generarse residuos procedentes del material removido, mientras que la zona de soldadura requiere una superficie limpia para trabajar con componentes, estaño y herramientas de precisión. Por esta razón, cada equipo debe ocupar una zona definida dentro de la estación.

La disponibilidad de alimentación eléctrica constituye otro aspecto necesario para el funcionamiento de los equipos. La CNC Genmitsu 3018-PRO utiliza una fuente de alimentación de 24 V conectada a su tarjeta de control. Desde esta tarjeta se gestionan los motores de los ejes X, Y y Z, el husillo y la conexión USB con la computadora.

La iluminación del área facilita la observación de pistas, componentes y uniones soldadas. Esta condición adquiere mayor importancia durante las etapas de montaje e inspección, donde se trabaja con elementos de pequeñas dimensiones. Además, la presencia del microscopio digital complementa la observación cuando los detalles de la placa no pueden distinguirse claramente a simple vista.

La organización general del escenario permite que las diferentes etapas del proceso se desarrollen dentro de una misma área, manteniendo una secuencia desde la preparación digital del diseño hasta la fabricación, ensamblaje, inspección y comprobación eléctrica de la PCB.

9.1.1.1 *Condiciones del área de trabajo*

Las condiciones del área influyen en la estabilidad de los equipos y en la facilidad con la que se desarrollan las diferentes actividades. La superficie destinada a la máquina CNC debe presentar suficiente firmeza para disminuir movimientos durante el desplazamiento de los ejes y el funcionamiento del husillo.

La ubicación de la computadora debe permitir una conexión directa con la tarjeta de control de la CNC mediante el cable USB, sin colocar los cables en zonas donde puedan interferir con el movimiento de personas o herramientas. El manual de la Genmitsu establece esta conexión como parte del sistema de control entre la computadora y la tarjeta electrónica de la máquina.

La zona destinada a soldadura e inspección requiere una superficie con suficiente espacio para colocar la PCB, componentes, cautín, aire caliente y elementos auxiliares. Esta área debe mantenerse separada de los residuos producidos durante el mecanizado, con el fin de conservar limpia la placa durante el montaje y revisión.

También resulta conveniente mantener los equipos de medición y las herramientas pequeñas en una zona de fácil acceso.

Condición	**Requerimiento considerado**	**Finalidad**
Superficie de trabajo	Firme y estable	Reducir movimientos durante el mecanizado
Alimentación eléctrica	Disponible para CNC, computadora y equipos auxiliares	Permitir el funcionamiento de la estación
Ventilación	Área con circulación de aire	Favorecer condiciones adecuadas durante mecanizado y soldadura
Iluminación	Suficiente sobre la zona de trabajo	Facilitar montaje e inspección
Espacio disponible	Distribución separada por actividades	Evitar interferencias entre mecanizado y ensamblaje
Acceso a controles	Interruptores y parada de emergencia accesibles	Mejorar la seguridad durante la operación
Orden de herramientas	Ubicación cercana al área de trabajo	Facilitar su uso durante las diferentes etapas

Tabla 19. Condiciones consideradas para el área de implementación

9.1.1.2 *Condiciones de seguridad*

La seguridad durante el uso de la estación resulta importante debido a la presencia de herramientas giratorias, partes móviles, elementos calientes y equipos eléctricos. Cada zona presenta riesgos diferentes, por lo cual deben considerarse medidas básicas antes y durante la operación.

En la máquina CNC, el husillo y la herramienta de corte representan las principales partes de riesgo mientras el equipo se encuentra en funcionamiento. El manual de la Genmitsu recomienda no tocar el husillo ni colocar partes del cuerpo cerca del área de trabajo durante la operación. También señala el uso de protección personal, especialmente gafas de seguridad, y establece que la máquina no debe permanecer sin supervisión mientras trabaja.

Durante las actividades de soldadura debe evitarse el contacto directo con la punta del cautín y con la salida de aire caliente, debido a las temperaturas elevadas que alcanzan estos elementos. La estación debe colocarse sobre una superficie resistente y con suficiente espacio alrededor para evitar el contacto accidental con otros objetos.

La manipulación de la PCB durante el montaje puede apoyarse mediante el sujetador ajustable, lo que reduce la necesidad de sostener la placa directamente con las manos mientras se utiliza el cautín o se trabaja con componentes pequeños.

También resulta necesario mantener los cables de alimentación y comunicación organizados. Una ubicación incorrecta puede provocar tirones, desconexiones o interferencias con el desplazamiento de herramientas y personas dentro del área.

Antes de iniciar cualquier mecanizado, debe verificarse la fijación de la placa, el estado de la herramienta y la conexión de la máquina. El manual de la Genmitsu recomienda realizar pruebas iniciales de movimiento de los ejes y del husillo antes de comenzar un trabajo, lo cual permite comprobar el funcionamiento básico del sistema.

Riesgo	Medida considerada
Contacto con el husillo	Mantener las manos fuera del área mientras la CNC funciona
Movimiento de los ejes	Verificar que no existan objetos dentro de la zona de desplazamiento
Desplazamiento de la PCB	Comprobar la fijación antes del mecanizado
Temperatura del cautín	Colocar la herramienta en su soporte cuando no se utiliza
Aire caliente	Mantener la boquilla alejada de personas y materiales sensibles
Cables eléctricos	Mantenerlos ordenados y fuera de las zonas de paso
Operación de la CNC	Mantener supervisión durante el proceso
Emergencia	Mantener libre el acceso al sistema de parada

Tabla 20. Medidas básicas de seguridad consideradas en la estación



Figura 32. Distribución del área de trabajo y ubicación de los principales equipos de la estación.

9.1.2 Fase 2: Integración y acondicionamiento de la estación

La segunda fase comprende la integración de los equipos y herramientas que forman parte de la estación para fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso. La organización se realizó considerando las diferentes actividades del proceso, de manera que cada equipo ocupe una zona de trabajo relacionada con su función.

La estación se dividió principalmente en áreas destinadas al mecanizado, preparación digital, ensamblaje, soldadura, inspección y comprobación eléctrica. Esta distribución permite mantener una secuencia de trabajo desde el diseño del circuito hasta la revisión final de la PCB.

La máquina CNC ocupa el área correspondiente a la fabricación de la placa. Junto a ella se encuentra la computadora utilizada para el manejo de los programas de diseño, generación de trayectorias y control de la máquina. En otra parte de la estación se ubican los elementos destinados al montaje y soldadura, mientras que el microscopio digital y el multímetro se encuentran disponibles para las etapas de inspección y comprobación.

La integración física busca mantener separados los trabajos que producen residuos, como el mecanizado, de aquellos que requieren una superficie limpia, especialmente el montaje de componentes y la soldadura. Al mismo tiempo, la ubicación de los equipos debe permitir un acceso sencillo sin interferir con el desplazamiento de los usuarios dentro del laboratorio.



Figura 33. Distribución general de los equipos que conforman la estación integral.

9.1.2.1 *Distribución física de la estación*

La distribución física se estableció según la función que cumple cada equipo durante la fabricación de la PCB. El área de mecanizado contiene la máquina CNC y los elementos destinados a la fijación y mecanizado de la placa. Cerca de esta zona se encuentra la computadora, debido a que mantiene comunicación directa con la tarjeta de control de la máquina.

La zona de ensamblaje contiene el sujetador de PCB y las herramientas utilizadas durante la colocación de los componentes. Este espacio se encuentra relacionado con el área de soldadura, donde se dispone del cautín y del sistema de aire caliente.

La inspección se desarrolla en una zona donde el microscopio digital puede utilizarse sin interferencias provenientes de residuos o herramientas de mecanizado. Finalmente, el

multímetro y los elementos destinados a las mediciones eléctricas se mantienen disponibles para las comprobaciones posteriores.

Esta distribución permite que la PCB siga un recorrido ordenado dentro de la estación:

Diseño → preparación digital → mecanizado → limpieza → montaje → soldadura → inspección → comprobación eléctrica.



Figura 34. Distribución de las áreas funcionales de la estación para fabricación y ensamblaje de PCB.

9.1.2.2 *Equipos y herramientas incorporados en la estación*

La estación está conformada por equipos destinados a cubrir las diferentes etapas de fabricación y ensamblaje. La máquina CNC se emplea en el mecanizado de la placa, mientras que la computadora reúne los programas requeridos durante el diseño, preparación de archivos y control del proceso.

El ensamblaje se complementa mediante una estación de soldadura y retrabajo, además de un sujetador ajustable que mantiene la PCB en una posición estable durante trabajos con componentes pequeños. La inspección visual cuenta con un microscopio digital, mientras que las comprobaciones eléctricas pueden desarrollarse mediante un multímetro.

Equipo o herramienta	Modelo o referencia	Función dentro de la estación
Máquina CNC	Genmitsu 3018-PRO	Mecanizado, perforación y corte de la PCB
Computadora	[Colocar características reales]	Diseño, preparación de archivos y control de la CNC
Software de diseño	Proteus 8.17	Diseño esquemático y desarrollo de la PCB
Software CAM	FlatCAM 8.993 Beta	Preparación de trayectorias y generación de código G
Software de control	Candle GRBL	Comunicación y control de la CNC
Estación de soldadura y retrabajo	YIHUA YH98 2 en 1	Soldadura y trabajos con aire caliente
Sujetador para PCB	[Colocar modelo si dispone]	Mantener estable la placa durante montaje y soldadura
Microscopio digital	DM7-Z33	Inspección ampliada de pistas, pads y soldaduras
Multímetro digital	[Colocar marca/modelo]	Pruebas de continuidad, resistencia y tensión
Fresas y brocas	Según operación	Fresado, perforación y corte
Herramientas auxiliares	Pinzas, cortadores, destornilladores, entre otras	Apoyo durante montaje y mantenimiento

Tabla 21. Equipos y herramientas incorporados en la estación integral

9.1.2.3 *Integración de la CNC Genmitsu 3018-PRO*

La Genmitsu 3018-PRO constituye el equipo principal para la etapa de mecanizado. El manual del fabricante identifica una estructura formada por perfiles de aluminio, guías lineales, tornillos de avance, motores paso a paso, conjunto de movimiento X-Z, husillo, sistema de control y mesa de trabajo.

El movimiento de la herramienta se desarrolla mediante los ejes X, Y y Z. Los motores paso a paso transmiten el movimiento a través de los tornillos de avance y permiten posicionar la herramienta durante las diferentes operaciones de mecanizado.

El husillo incorpora un sistema ER11 para la sujeción de herramientas. Este conjunto permite colocar fresas o brocas según la operación requerida. El manual también incluye abrazaderas destinadas a mantener fija la pieza sobre la mesa durante el trabajo.

Para la integración dentro de la estación, la máquina debe encontrarse sobre una superficie firme y con suficiente espacio alrededor para acceder a la mesa, cambiar herramientas y retirar residuos después del mecanizado.

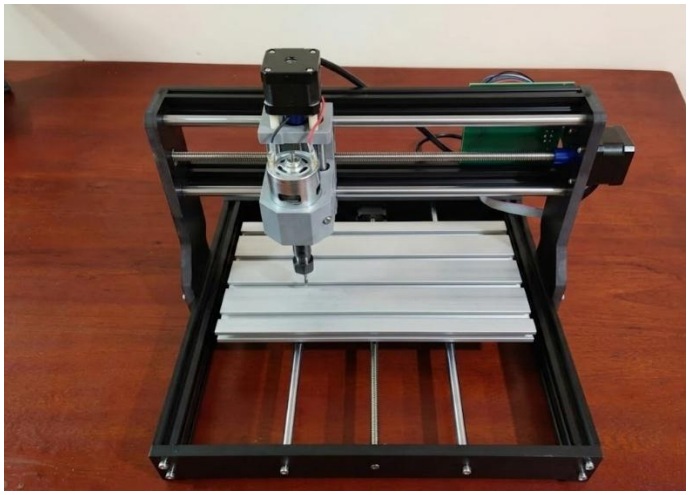


Figura 35. Máquina CNC Genmitsu 3018-PRO integrada

Elemento	**Función**
Eje X	Desplazamiento lateral de la herramienta
Eje Y	Desplazamiento longitudinal de la mesa
Eje Z	Movimiento vertical de la herramienta
Motores paso a paso	Generación del movimiento de los ejes
Husillo	Movimiento giratorio de la herramienta de corte
Portaherramientas ER11	Sujeción de fresas y brocas
Mesa de trabajo	Superficie para fijar la placa
Abrazaderas	Mantienen la PCB en posición
Tarjeta de control	Coordina motores, husillo y comunicación
Fuente de alimentación	Suministra energía al sistema

Tabla 22. Elementos principales de la CNC Genmitsu 3018-PRO

9.1.2.4 *Conexión eléctrica y de control de la CNC*

La máquina integra una tarjeta electrónica encargada de controlar los tres motores de los ejes y el husillo. El manual muestra conexiones independientes para los motores X, Y y Z, además de la entrada de alimentación de 24 V y la conexión USB con la computadora.

La conexión USB establece el enlace entre el equipo informático y la tarjeta de control. Por este medio se transmiten las instrucciones procedentes del programa Candle GRBL durante la operación de la máquina.

La alimentación principal de la CNC se realiza mediante una fuente de 24 V. El manual incluye este elemento como parte del conjunto de la máquina junto con la tarjeta de control, husillo, motores y cableado.

Antes del funcionamiento se revisa que los conectores correspondientes a los motores y al husillo estén colocados en sus posiciones. También se comprueba la conexión USB y la alimentación antes de iniciar las pruebas de movimiento.

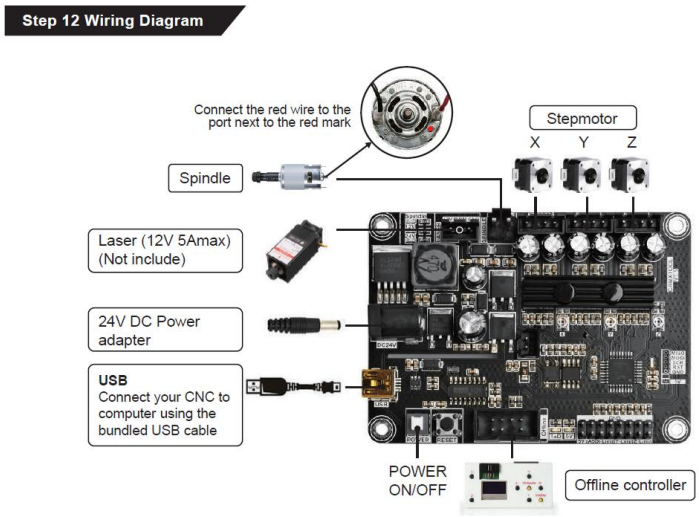


Figura 36. Esquema de conexión eléctrica y de control de la CNC Genmitsu 3018-PRO.

Conexión	**Elemento conectado**	**Función**
X	Motor paso a paso del eje X	Movimiento lateral
Y	Motor paso a paso del eje Y	Movimiento longitudinal
Z	Motor paso a paso del eje Z	Movimiento vertical
Spindle	Motor del husillo	Giro de la herramienta
24 V DC	Fuente de alimentación	Energía para la tarjeta y actuadores
USB	Computadora	Comunicación con el software de control
Offline Controller	Controlador independiente	Control alternativo sin computadora

Tabla 23. Conexiones principales de la CNC Genmitsu 3018-PRO

9.1.3 Fase 3: Configuración y puesta en funcionamiento de la CNC

La tercera fase comprende la preparación de la máquina CNC antes del mecanizado de la placa de circuito impreso. Esta etapa incluye la conexión entre la computadora y la tarjeta de control, reconocimiento del puerto de comunicación, configuración del software Candle GRBL, comprobación de los movimientos en los ejes X, Y y Z y revisión del funcionamiento del husillo.

La máquina Genmitsu 3018-PRO utiliza una conexión USB para establecer comunicación con la computadora. Según el manual del fabricante, el sistema requiere el controlador CH340 para que Windows reconozca la tarjeta de control como un puerto serial. Una vez instalado, el puerto correspondiente puede identificarse desde el administrador de dispositivos del sistema operativo.

Después de establecer la comunicación, la máquina puede controlarse mediante Candle GRBL. El manual de la Genmitsu incluye GrblControl/Candle como parte del software utilizado con la CNC en Windows.

La configuración previa permite comprobar que la máquina responda de manera correcta antes de cargar un archivo de mecanizado. De esta forma se reducen posibles errores relacionados con la comunicación, dirección de los ejes, posición inicial de la herramienta o funcionamiento del husillo.

9.1.3.1 *Instalación del controlador de comunicación*

Para que la computadora reconozca la tarjeta electrónica de la CNC se requiere un controlador de comunicación USB. El manual de la Genmitsu identifica el controlador CH340SER como el software utilizado para establecer este enlace.

Una vez instalado el controlador, la máquina aparece dentro del sistema operativo como un puerto serial USB. La identificación del número de puerto es necesaria debido a que este valor debe seleccionarse posteriormente dentro de Candle GRBL.

El puerto asignado puede variar según la computadora utilizada y la entrada USB donde se encuentre conectada la máquina. Por esta razón, se revisa el administrador de dispositivos antes de iniciar la comunicación con el software.



Figura 37. Identificación del puerto COM correspondiente a la CNC Genmitsu 3018-PRO.

9.1.3.2 *Comunicación entre la computadora y la CNC*

Después del reconocimiento del puerto serial, se establece la conexión con Candle GRBL. Para esto se selecciona el puerto COM correspondiente y la velocidad de comunicación configurada para la tarjeta.

En la fundamentación del proyecto ya se considera una velocidad de comunicación de 115200 baudios como valor normalmente utilizado para establecer el enlace con GRBL.

La conexión se considera estable cuando el programa reconoce la tarjeta de control y permite el desplazamiento manual de los ejes. El manual de la Genmitsu también indica que, cuando la comunicación con la controladora se establece correctamente, el software muestra un estado normal de operación, como Idle.

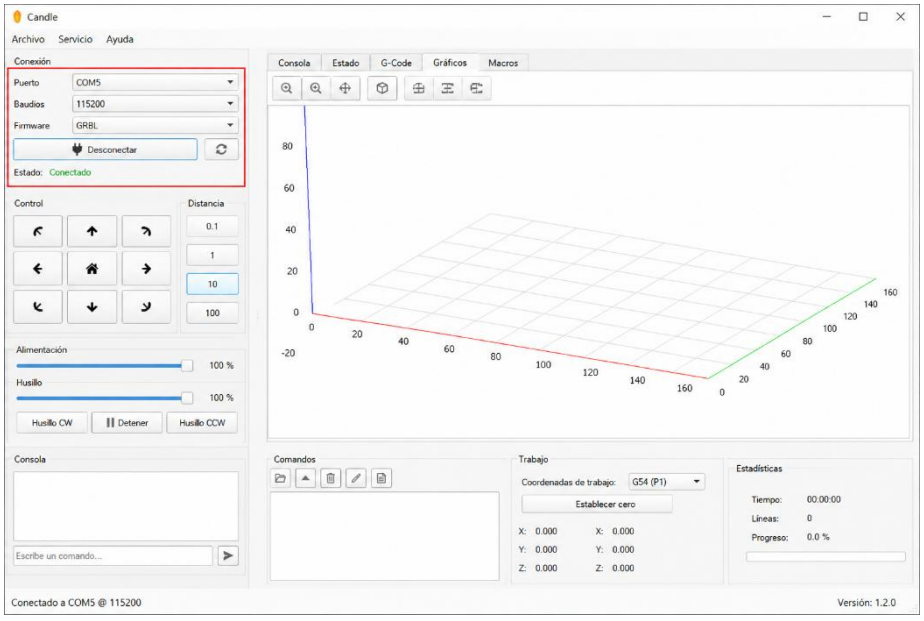


Figura 38. Configuración del puerto de comunicación en Candle GRBL.

Parámetro	Configuración
Tipo de conexión	USB
Controlador	CH340
Software de control	Candle GRBL
Puerto de comunicación	COM [colocar número real]
Velocidad de comunicación	115200 baudios
Controlador de la máquina	GRBL
Estado esperado	Idle

Tabla 24. Parámetros de comunicación entre la computadora y la CNC

9.1.3.3 *Configuración de Candle GRBL*

Candle GRBL se emplea como interfaz entre la computadora y la tarjeta de control de la CNC. Una vez establecida la conexión, el programa permite desplazar manualmente los ejes, controlar el husillo, cargar el archivo de código G y ejecutar el proceso de mecanizado.

Entre los controles utilizados se encuentran las opciones de movimiento manual, establecimiento de coordenadas, apertura del archivo y envío del código G hacia la controladora. En la fundamentación ya se identificaron funciones como conexión, carga del archivo, inicio, pausa, reanudación, parada, reinicio y desbloqueo del sistema.

Antes del mecanizado, se revisa que no existan alarmas activas y que la máquina responda a los comandos manuales. Si el sistema presenta una condición de alarma, Candle permite utilizar las opciones Reset y Unlock para regresar al estado de operación, cuando la condición de la máquina lo permite. El manual de la Genmitsu describe este procedimiento durante las pruebas iniciales del equipo.

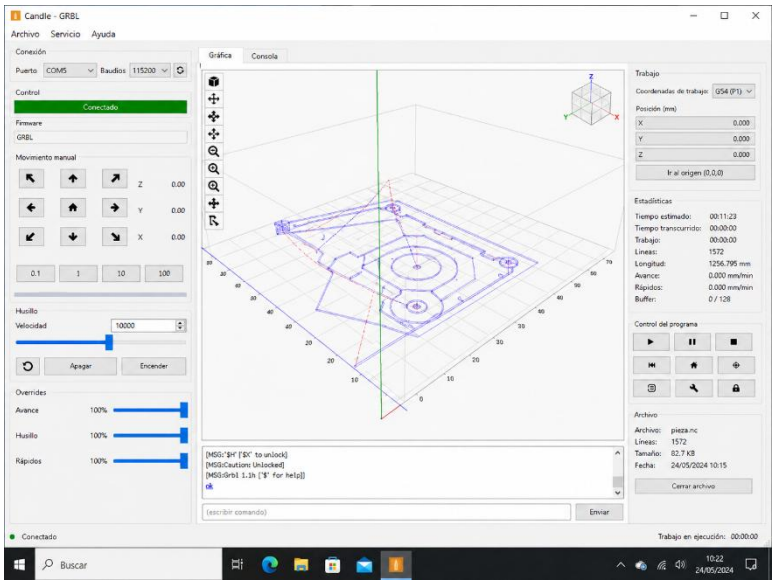


Figura 39. Ventana de Candle GRBL utilizada para el control de la CNC.

9.1.3.4 *Comprobación de los ejes X, Y y Z*

Antes de ejecutar un archivo de mecanizado se comprueba el desplazamiento de los tres ejes de la máquina. Esta revisión permite identificar problemas de comunicación, dirección incorrecta de movimiento o bloqueos mecánicos.

El manual de la Genmitsu recomienda verificar los movimientos en X, Y y Z mediante los controles manuales del programa antes de iniciar un trabajo. También sugiere utilizar valores moderados de avance durante estas pruebas iniciales.

La comprobación se realiza mediante movimientos cortos en sentido positivo y negativo para cada eje. Durante esta prueba se observa que el desplazamiento sea continuo, que no existan trabamientos y que la dirección mostrada por el software coincida con el movimiento físico de la máquina.

Eje	**Comprobación realizada**	**Criterio esperado**	**Resultado**
X	Movimiento positivo y negativo	Desplazamiento continuo y sin bloqueo	Cumple
Y	Movimiento positivo y negativo	Desplazamiento continuo y sin bloqueo	Cumple
Z	Movimiento positivo y negativo	Desplazamiento continuo y sin bloqueo	Cumple

Tabla 25. Comprobación inicial del movimiento de los ejes

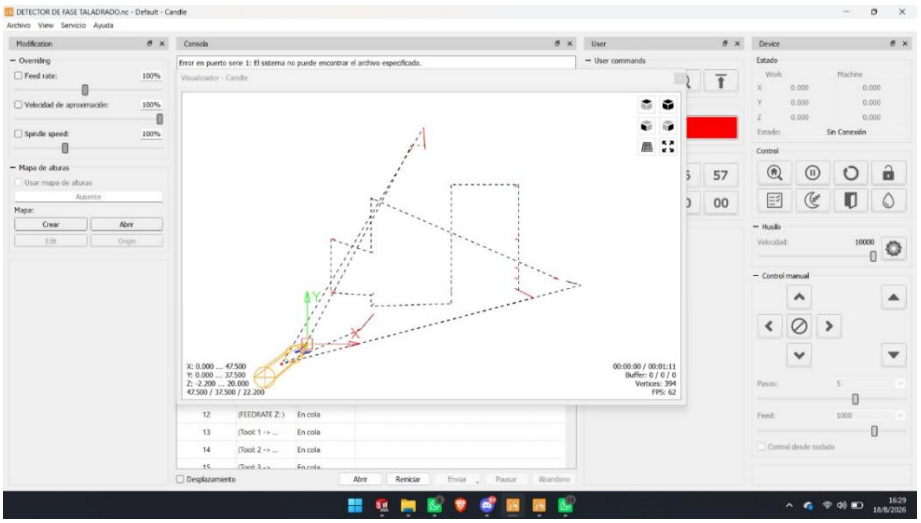


Figura 40. Comprobación manual de los movimientos de los ejes X, Y y Z.

9.1.3.5 *Comprobación del husillo*

El husillo es el elemento encargado de transmitir el movimiento giratorio a la herramienta de corte. Antes del mecanizado se comprueba su encendido y respuesta desde Candle GRBL.

El manual recomienda activar el husillo y verificar que el motor responda correctamente antes de iniciar el movimiento de la herramienta sobre la pieza.

También debe considerarse que el valor mostrado en el control del husillo dentro del software puede representar un porcentaje o nivel de control y no necesariamente una velocidad real expresada directamente en revoluciones por minuto. El propio manual señala esta diferencia en la interfaz de GrblControl.

Por esta razón, si durante el proyecto no se utiliza un tacómetro para medir las revoluciones reales, es más correcto registrar el valor de control configurado en Candle y evitar indicar una velocidad exacta en rpm sin una medición.

Comprobación	**Criterio**
Encendido	El husillo inicia el giro
Apagado	El husillo se detiene
Estabilidad	Giro continuo sin interrupciones visibles
Sujeción de herramienta	Fresa o broca fija en el ER11
Sentido de giro	Adecuado para la herramienta utilizada

Tabla 26. Comprobaciones previas del husillo

9.1.3.6 *Configuración del origen de trabajo*

El origen de trabajo establece el punto de referencia desde donde la CNC interpreta las coordenadas del archivo de mecanizado. Antes de iniciar el fresado, la herramienta se posiciona sobre la placa mediante los controles manuales de Candle.

El manual de la Genmitsu indica que la herramienta puede desplazarse mediante los controles de movimiento y posteriormente establecer los valores Zero XY y Zero Z antes de abrir y ejecutar el archivo de código G.

Para los ejes X y Y, el punto cero se ubica en una referencia definida sobre la placa. Esta posición debe coincidir con el origen utilizado durante la generación de las trayectorias de mecanizado.

En el eje Z, la referencia corresponde a la posición de la herramienta respecto a la superficie de cobre. Debido a que la profundidad de aislamiento de las pistas es pequeña, esta configuración debe realizarse con cuidado para evitar un corte excesivo o una profundidad insuficiente.

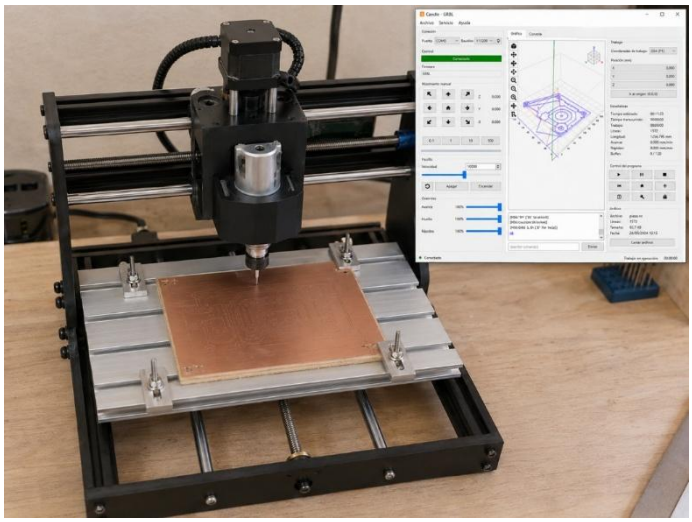


Figura 41. Establecimiento del punto cero en los ejes X, Y y Z.

Eje	**Referencia**
X	Punto inicial horizontal de la PCB
Y	Punto inicial longitudinal de la PCB
Z	Superficie de cobre de la placa

Tabla 27. Referencias establecidas para el origen de trabajo

9.1.3.7 *Verificación previa al mecanizado*

Una vez configurada la comunicación, los movimientos y el origen de trabajo, se realiza una revisión general antes de ejecutar el código G. Esta verificación incluye la fijación de la placa, estado de la herramienta, ausencia de objetos dentro del recorrido de los ejes y correcta conexin de la CNC.

El manual de la Genmitsu recomienda realizar pruebas básicas del sistema antes de comenzar un trabajo, con el propósito de confirmar la respuesta de la tarjeta, los ejes y el husillo.

La revisión previa evita que un error básico de configuración afecte la placa o la herramienta durante el mecanizado.

Elemento	**Comprobación**
Conexión USB	Comunicación estable
Puerto COM	Puerto correcto seleccionado
Candle GRBL	Estado operativo
Ejes X, Y y Z	Movimiento correcto
Husillo	Funcionamiento estable
Herramienta	Correctamente instalada
PCB	Fijada sobre la mesa
Origen X-Y	Establecido
Origen Z	Establecido sobre la superficie
Área de trabajo	Libre de obstáculos

Tabla 28. Lista de comprobación previa al mecanizado

9.1.4 Fase 4: Preparación y fabricación de la PCB de prueba

La cuarta fase corresponde a la preparación y fabricación de la placa de circuito impreso utilizada para comprobar el funcionamiento de la estación integral. Para esta etapa se seleccionó como circuito de prueba un detector de fase, debido a que permite desarrollar de manera completa las actividades de diseño electrónico, generación de la PCB, mecanizado, perforación y posterior montaje de los componentes.

El proceso comienza con el desarrollo del circuito en Proteus 8.17, donde se realiza el esquema electrónico y posteriormente la distribución física de los componentes sobre la placa. A partir

de este diseño se obtienen los archivos necesarios para el mecanizado, los cuales se procesan mediante FlatCAM 8.993 Beta antes de su ejecución en la máquina CNC.

La metodología establecida en el proyecto contempla precisamente la generación de archivos Gerber y código G, seguida del aislamiento de pistas, perforado y ruteado del contorno de la PCB.

9.1.4.1 *Selección del circuito detector de fase*

Para la validación de la estación se seleccionó un circuito detector de fase como placa de prueba. Esta elección permite disponer de un circuito electrónico que requiere pistas conductoras, pads, perforaciones, montaje de componentes y un proceso posterior de soldadura, lo cual resulta adecuado para comprobar las diferentes etapas consideradas dentro del proyecto.

La PCB del detector de fase no se utiliza únicamente para verificar el funcionamiento de la máquina CNC, sino también para comprobar posteriormente las etapas de ensamblaje, inspección y verificación eléctrica. De esta manera, una misma placa sirve como elemento de prueba durante todo el proceso desarrollado en la estación.

En este apartado todavía no conviene describir valores eléctricos, componentes ni tensión de funcionamiento, porque no me has dado el esquema exacto del detector de fase. Es mejor colocar esos datos únicamente cuando tengamos el circuito definitivo de Proteus 8.17.

Criterio	**Aplicación en el detector de fase**
Diseño electrónico	Permite desarrollar el esquema en Proteus 8.17
Diseño PCB	Requiere distribución de pistas, pads y componentes
Mecanizado	Permite realizar aislamiento de pistas
Perforación	Requiere orificios para montaje de componentes
Ensamblaje	Permite colocar los componentes sobre la PCB
Soldadura	Requiere la unión eléctrica de los terminales
Inspección	Permite revisar pistas, pads y uniones soldadas
Verificación eléctrica	Permite comprobar continuidad y funcionamiento

Tabla 29. Criterios considerados para la selección del circuito de prueba

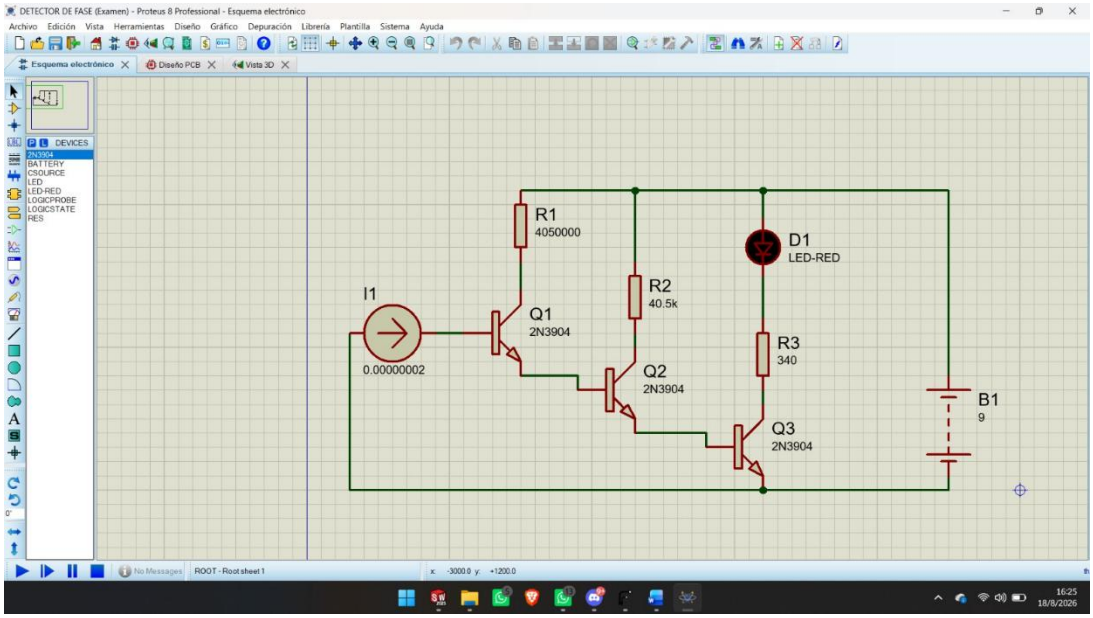


Figura 42. Circuito detector de fase seleccionado para la validación de la estación.

9.1.4.2 *Diseño esquemático del detector de fase en Proteus 8.17*

El diseño del circuito se desarrolla mediante Proteus 8.17. En esta primera etapa se ubican los componentes que conforman el detector de fase y se realizan las conexiones eléctricas correspondientes según el esquema definido.

El entorno ISIS de Proteus permite representar el circuito electrónico y comprobar previamente su organización antes de realizar el diseño físico de la placa. En la fundamentación del proyecto ya se estableció que Proteus permite trabajar con diseño esquemático, simulación y desarrollo de PCB.

Una vez completado el esquema, se revisa que los componentes cuenten con encapsulados compatibles con el diseño de la PCB. Esta comprobación resulta necesaria porque posteriormente cada componente debe disponer de pads y, cuando corresponde, perforaciones adecuadas para su montaje físico.

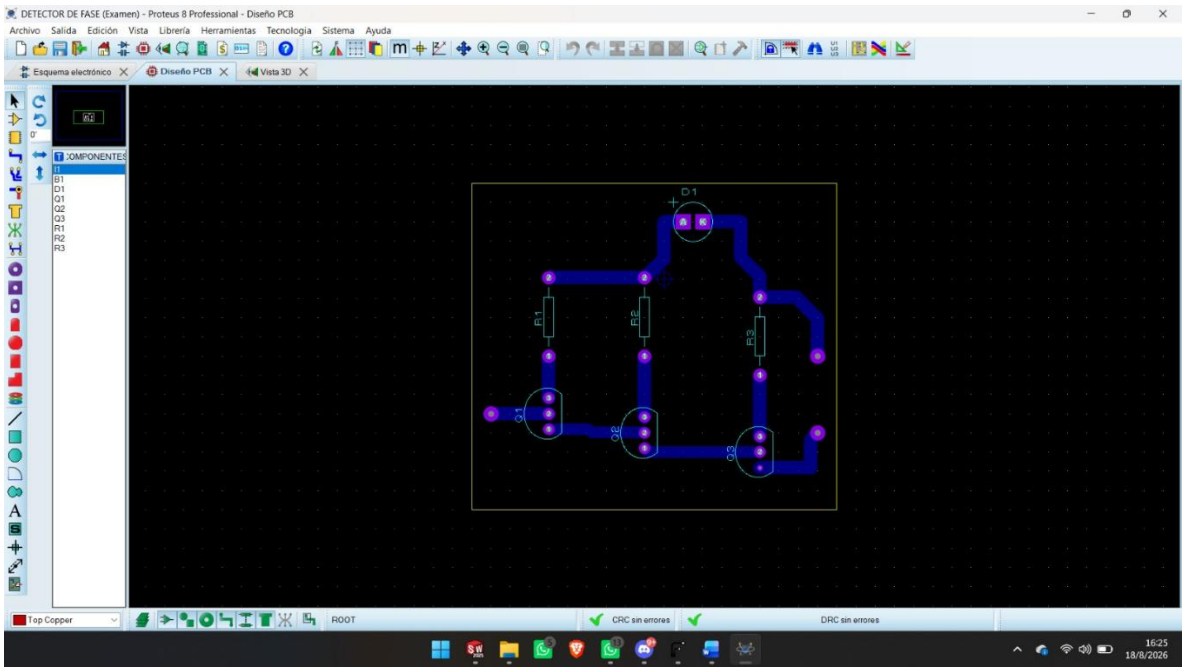


Figura 43. Diseño esquemático del detector de fase desarrollado en Proteus 8.17.

9.1.4.3 *Diseño de la placa de circuito impreso*

Después de completar el esquema electrónico se desarrolla la distribución física de la PCB. En esta etapa se ubican los componentes y se trazan las pistas de cobre que permitirán establecer las conexiones eléctricas del detector de fase.

La ubicación de los componentes debe considerar suficiente espacio para el montaje y la soldadura, evitando cruces innecesarios entre pistas y manteniendo una distribución que facilite posteriormente la inspección.

El diseño obtenido representa la geometría que será transferida al proceso de mecanizado mediante los archivos de fabricación.

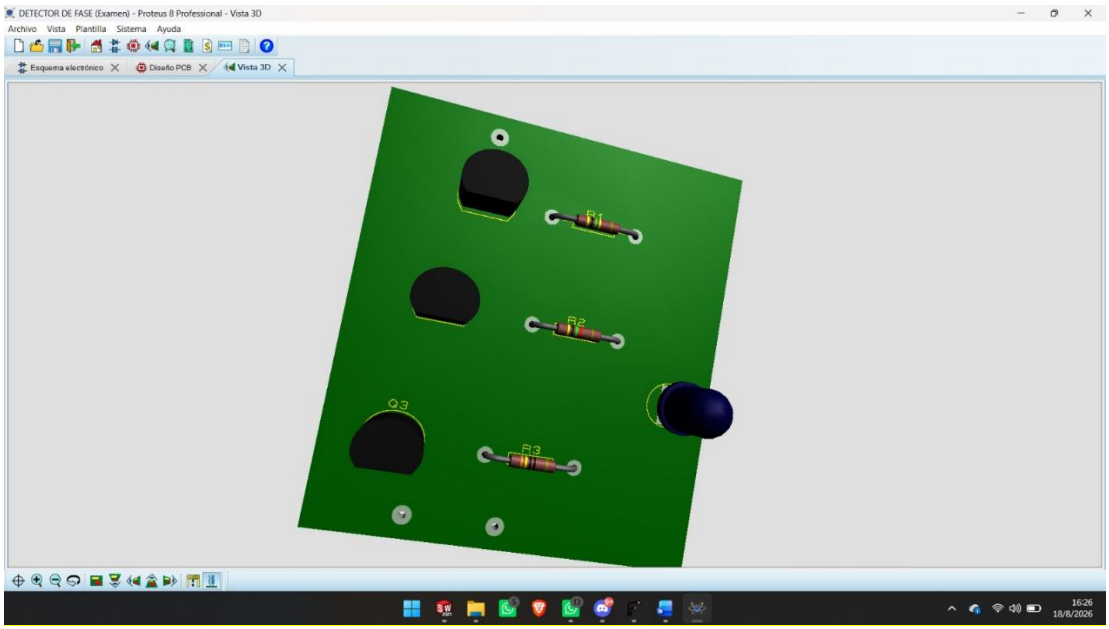


Figura 44. Vista tridimensional del detector de fase diseñada en Proteus 8.17.

9.1.4.4 *Características del diseño de la PCB*

Antes de generar los archivos de fabricación, conviene registrar las principales características físicas de la placa diseñada.

Parámetro	**Valor**
Dimensión de la PCB	60 mm × 45 mm
Número de componentes	7
Número de perforaciones	20
Ancho de pista principal	1.5 mm
Diámetro de pads	2.2 mm
Tecnología de montaje	THT
Número de capas	1
Material previsto	FR-4 revestido de cobre por una cara

Tabla 30. Características de diseño de la PCB del detector de fase

9.1.4.5 *Generación de archivos Gerber y Excellon*

Una vez finalizado el diseño de la PCB, se generan los archivos de fabricación requeridos para el mecanizado.

El archivo Gerber contiene la información asociada a las pistas y geometrías de cobre, mientras que el archivo Excellon reúne las coordenadas y diámetros correspondientes a las perforaciones.

En el proyecto, estos archivos permiten separar las diferentes operaciones que realizará posteriormente la CNC:

- aislamiento de pistas;
- perforaciones;
- corte del contorno.

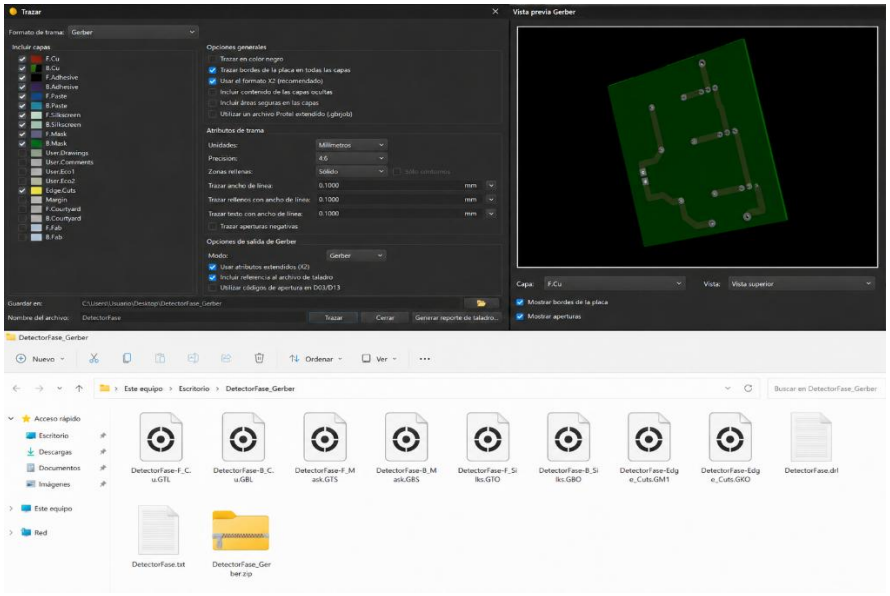


Figura 45. Generación de archivos Gerber y Excellon del detector de fase.

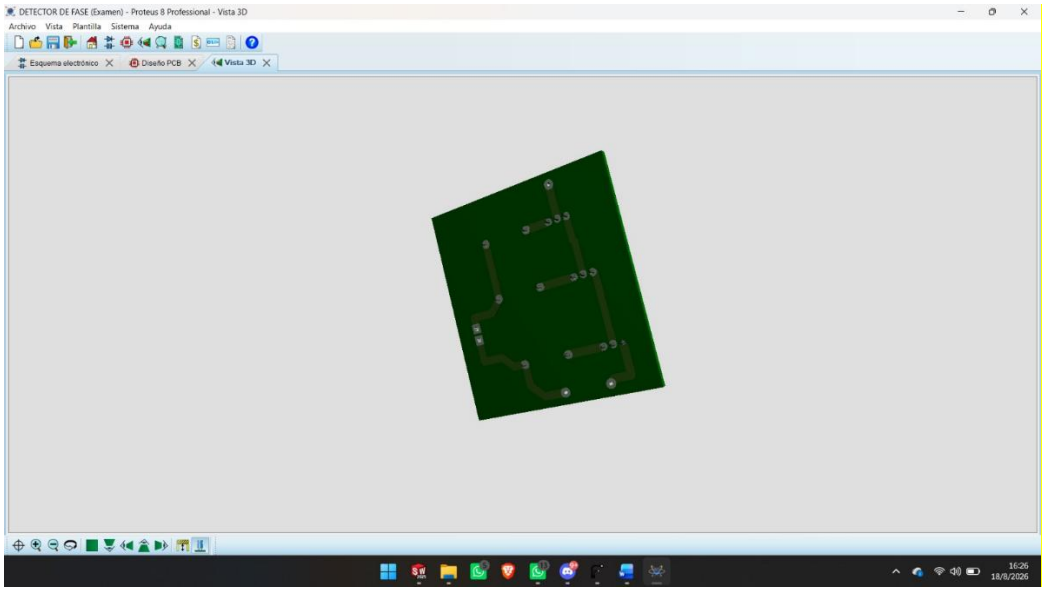


Figura 46. Archivos de fabricación obtenidos desde Proteus 8.17.

9.1.4.6 *Procesamiento de los archivos en FlatCAM 8.993 Beta*

Los archivos obtenidos desde Proteus se importan en FlatCAM 8.993 Beta para generar las trayectorias requeridas por la CNC.

El proyecto ya establece en la fundamentación que FlatCAM permite trabajar con objetos Gerber, Excellon, Geometry y CNC Job, los cuales forman parte del proceso que convierte los archivos de fabricación en instrucciones para la máquina.

Para la PCB del detector de fase se preparan tres operaciones principales:

Aislamiento de pistas: genera la trayectoria alrededor de las zonas conductoras.

Perforación: genera los movimientos correspondientes a los orificios de los componentes.

Perfilado o corte: genera la trayectoria exterior utilizada para separar la PCB.

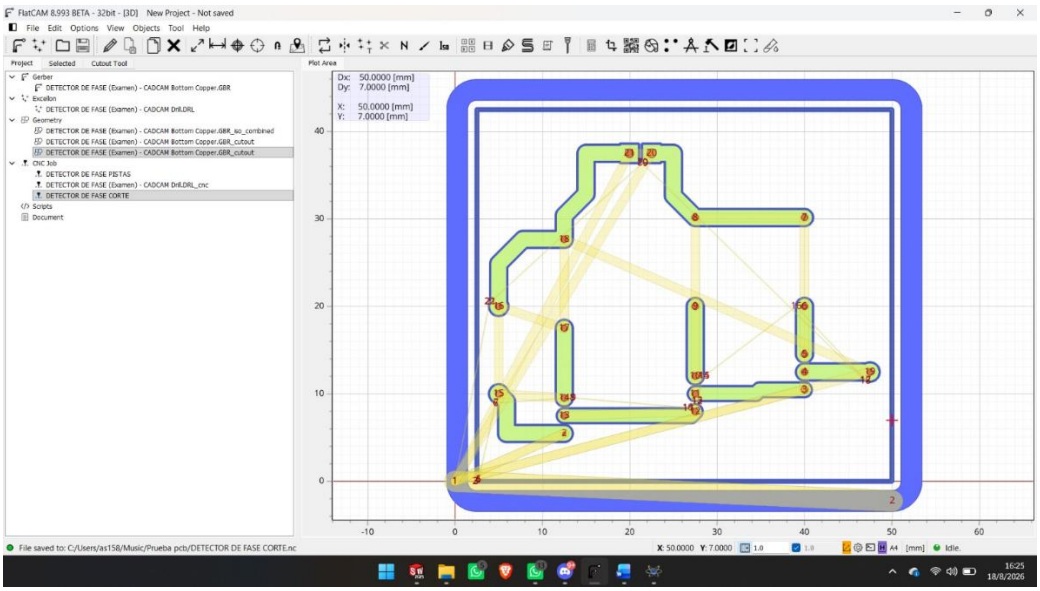


Figura 47. Archivo Gerber del detector de fase cargado en FlatCAM 8.993 Beta.

9.1.4.7 *Generación de la trayectoria de aislamiento*

La primera operación corresponde al aislamiento de las pistas. En FlatCAM se selecciona el archivo Gerber y se genera una geometría alrededor de las zonas conductoras.

La herramienta debe eliminar una pequeña cantidad de cobre alrededor de cada pista sin afectar el material conductor necesario para el circuito.

En esta etapa se establecen parámetros como:

diámetro de la herramienta;

profundidad de corte;

velocidad de avance;

número de pasadas, si corresponde.

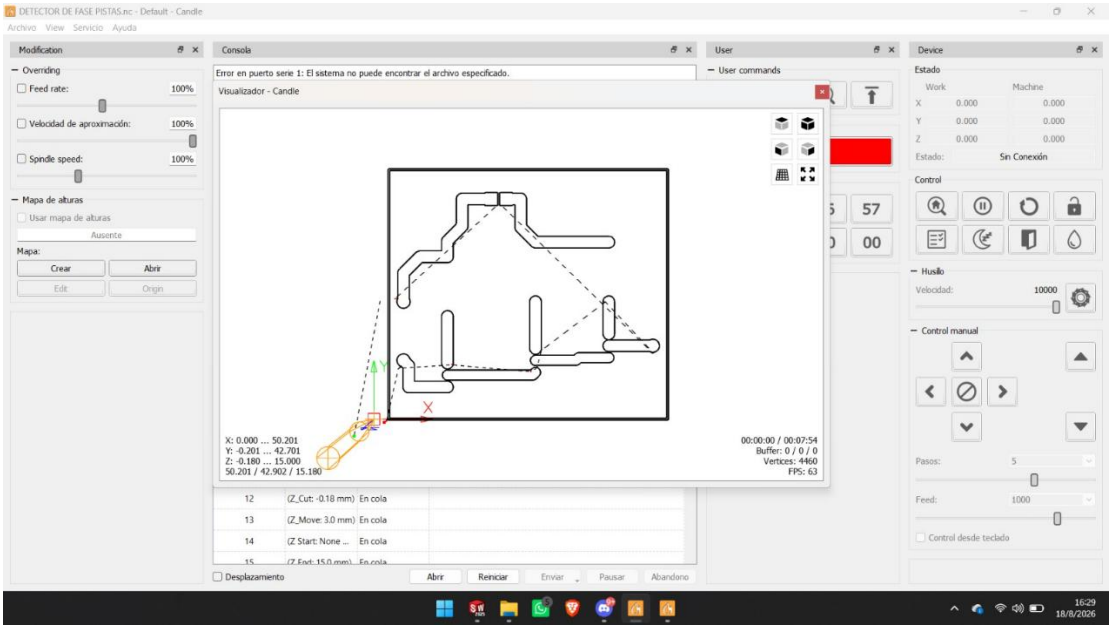


Figura 48. Trayectoria de aislamiento de las pistas del detector de fase.

9.1.4.8 *Generación de la trayectoria de perforación*

La siguiente operación corresponde a las perforaciones necesarias para insertar los terminales de los componentes.

El archivo Excellon generado desde Proteus se carga en FlatCAM y permite visualizar los puntos de perforación. A partir de esta información se establece el diámetro de la herramienta y la profundidad requerida.

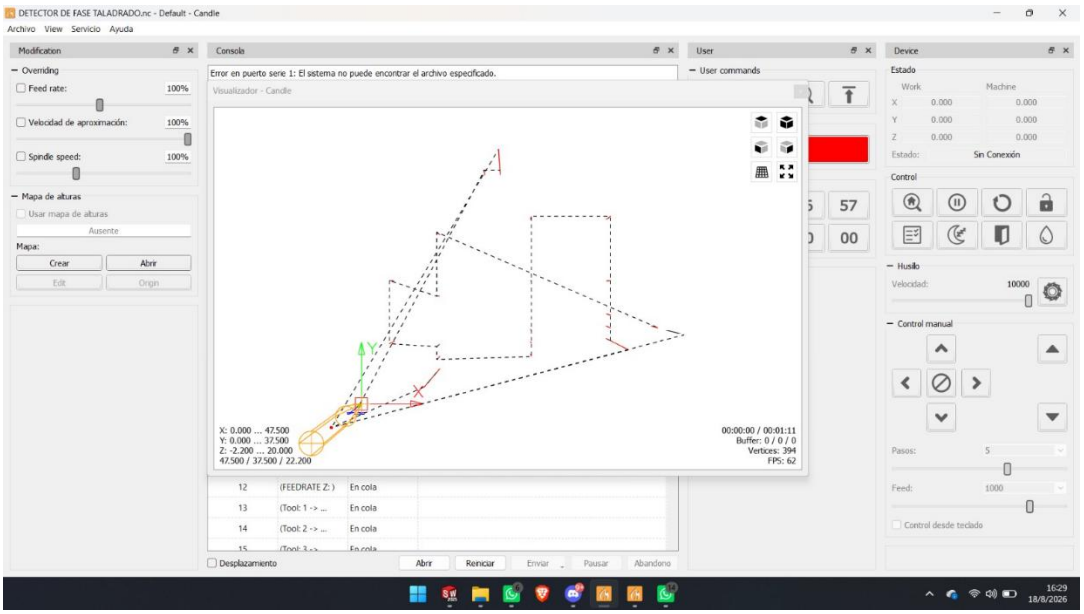


Figura 49. Perforaciones del detector de fase cargadas en FlatCAM 8.993 Beta.

9.1.4.9 *Generación de la trayectoria de corte del contorno*

Después de preparar las pistas y perforaciones, se establece la geometría correspondiente al contorno de la PCB.

Esta trayectoria permite separar la placa del material base una vez finalizadas las operaciones anteriores. Para evitar daños durante el corte se debe utilizar una herramienta adecuada y una profundidad suficiente para atravesar el espesor del material.

9.1.4.10 *Parámetros establecidos para el mecanizado*

Antes de generar el código G definitivo se registran los parámetros utilizados en cada operación.

Operación	Herramienta	Diámetro	Profundidad	Avance	Control del husillo
Aislamiento	Fresa tipo V	0.1 mm	0.1 mm	120 mm/min	100
Perforación	Broca	0.9 mm	1.8 mm	100 mm/min	100
Corte	Fresa de perfilado	1 mm	1.8 mm	80 mm/min	100

Tabla 31. Parámetros de mecanizado establecidos para la PCB del detector de fase

9.1.4.11 *Generación del código G*

Una vez definidas las trayectorias y parámetros, FlatCAM genera los archivos CNC Job correspondientes a cada operación.

Estos archivos contienen las instrucciones de movimiento que posteriormente son interpretadas por la controladora GRBL.

Para evitar confusiones, conviene guardar cada operación por separado, por ejemplo:

- Detector_fase_pistas.nc
- Detector_fase_perforado.nc
- Detector_fase_contorno.nc

Esto permite ejecutar cada procedimiento de manera ordenada y cambiar la herramienta cuando sea necesario.

9.1.4.12 *Carga del código G en Candle GRBL*

Los archivos generados en FlatCAM se abren posteriormente en Candle GRBL.

El software permite visualizar la trayectoria antes de iniciar el trabajo y enviar las instrucciones hacia la tarjeta GRBL. Las funciones de carga y envío del archivo ya están contempladas dentro de la fundamentación del proyecto.

Antes de iniciar el mecanizado se verifica:

- puerto de comunicación;
- estado Idle;
- origen X, Y y Z;
- herramienta instalada;
- fijación de la PCB;
- visualización correcta del código G.

9.1.4.13 *Fijación de la placa y preparación del mecanizado*

La placa debe sujetarse firmemente sobre la mesa de la CNC antes de iniciar cualquier operación.

Las abrazaderas deben ubicarse en zonas donde no interfieran con el recorrido de la herramienta. Posteriormente se instala la fresa correspondiente y se establece el origen de trabajo según el procedimiento desarrollado en la Fase 3.

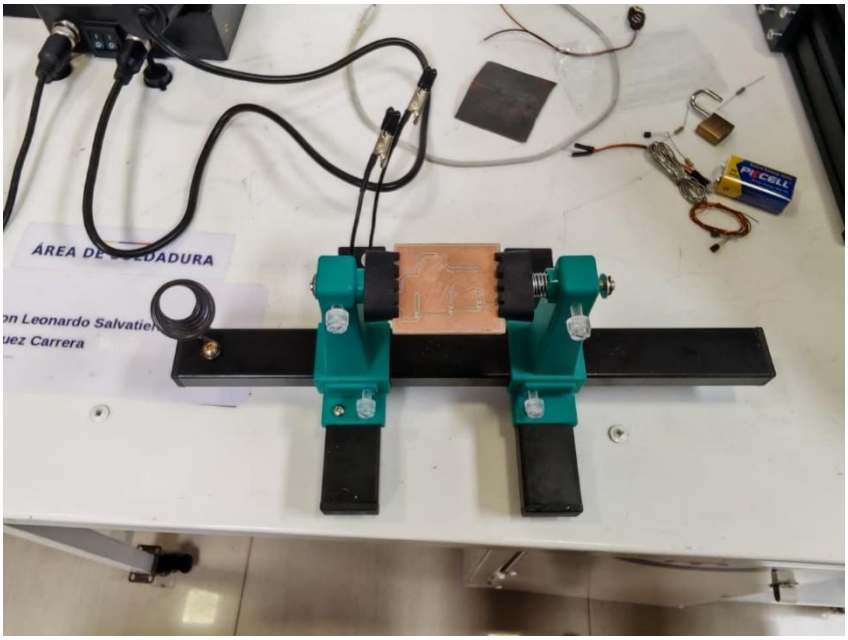


Figura 50. Fijación de la placa para el mecanizado del detector de fase.

9.1.4.14 *Fresado de aislamiento de las pistas*

Con la placa fijada y el origen establecido se ejecuta el archivo correspondiente al aislamiento.

Durante el proceso se observa el recorrido de la herramienta y se verifica que la profundidad permita retirar el cobre alrededor de las pistas sin eliminar las zonas conductoras del circuito.

También debe registrarse el tiempo de mecanizado, ya que esta variable forma parte del proceso de validación planteado en el proyecto.

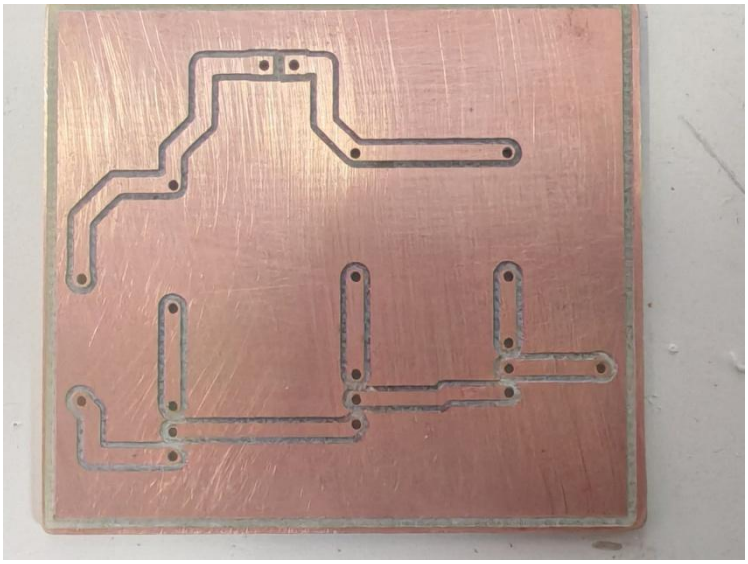


Figura 51. Fresado de aislamiento de las pistas del detector de fase.

9.1.4.15 *Perforación de la PCB*

Finalizado el aislamiento se realiza el cambio de herramienta para ejecutar las perforaciones.

El archivo correspondiente se carga en Candle y se mantiene el mismo sistema de referencia X-Y utilizado durante el mecanizado. El eje Z se ajusta nuevamente de acuerdo con la herramienta instalada.

9.1.4.16 *Corte del contorno*

La última operación de mecanizado corresponde al perfilado exterior.

Después del cambio de herramienta y ajuste del eje Z se ejecuta el archivo generado para el contorno. Una vez concluido el proceso, la PCB puede separarse del material base.

9.1.4.17 *Limpieza y preparación de la PCB mecanizada*

Finalizado el mecanizado se retiran los residuos presentes sobre la superficie y en las perforaciones.

Después de la limpieza se realiza una primera revisión visual de las pistas, pads y orificios antes de iniciar el montaje de componentes.

Etapa	**Software/equipo**	**Producto obtenido**
Diseño esquemático	Proteus 8.17	Circuito detector de fase
Diseño PCB	Proteus 8.17	Distribución física de pistas y componentes
Exportación	Proteus 8.17	Archivos Gerber y Excellon
Procesamiento CAM	FlatCAM 8.993 Beta	Trayectorias de aislamiento, perforación y corte
Generación CNC	FlatCAM 8.993 Beta	Archivos de código G
Ejecución	Candle GRBL	Envío del código hacia la CNC
Mecanizado	Genmitsu 3018-PRO	PCB fresada, perforada y recortada
Limpieza	Herramientas auxiliares	PCB preparada para ensamblaje

Tabla 32. Secuencia aplicada durante la fabricación de la PCB del detector de fase

9.1.5 Fase 5: Ensamblaje y validación experimental de la estación

La quinta fase corresponde al ensamblaje y validación de la placa del detector de fase obtenida durante el mecanizado. En esta etapa se consideran las características físicas de las pistas y

perforaciones, el tiempo empleado durante la manufactura, la colocación de los componentes, las condiciones de soldadura, la inspección óptica y las comprobaciones eléctricas del circuito.

La validación permite comprobar el trabajo conjunto de los equipos que forman parte de la estación. La máquina CNC interviene en la fabricación de la placa; el área de montaje y soldadura permite incorporar los componentes; el microscopio digital facilita la revisión de pistas y uniones, mientras que el multímetro se emplea durante las pruebas eléctricas.

Los parámetros considerados mantienen relación con la matriz de operacionalización del proyecto, donde se establecieron como indicadores el ancho de las pistas, diámetro de los orificios y tiempo de manufactura. Para estas variables se plantearon mediciones mediante calibrador y cronómetro.

9.1.5.1 *Medición dimensional de la PCB mecanizada*

Después de la limpieza de la placa se realiza una revisión de las principales características obtenidas durante el mecanizado. En esta etapa se consideran el ancho de las pistas y el diámetro de los orificios, debido a que ambos parámetros influyen en el montaje y en la conexión eléctrica de los componentes.

El ancho de las pistas se comprueba en varios puntos seleccionados del circuito. Las mediciones deben realizarse en zonas donde la geometría pueda observarse claramente y posteriormente se comparan con el valor establecido en el diseño desarrollado en Proteus 8.17.

Para las perforaciones se seleccionan varios orificios de la PCB y se registra su diámetro. La comparación se realiza respecto al valor utilizado durante el diseño y al diámetro de la herramienta empleada durante el mecanizado.

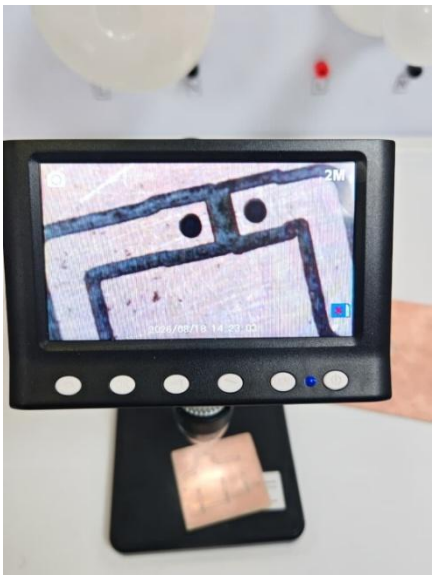


Figura 52. Medición del ancho de las pistas de la PCB del detector de fase.



Figura 53. Medición de los orificios presentes en la PCB del detector de fase.

Parámetro	**Valor de diseño**	**Instrumento**	**Unidad**	**Número de mediciones**
Ancho de pista	1,50	Calibrador digital	mm	5
Diámetro de orificio	0,90	Calibrador digital	mm	5
Largo de la PCB	60,00	Calibrador digital	mm	3
Ancho de la PCB	45,00	Calibrador digital	mm	3

Tabla 33. Parámetros considerados durante la medición dimensional de la PCB

9.1.5.2 *Registro del tiempo de manufactura*

El tiempo constituye otro de los indicadores definidos en la matriz de variables del proyecto. Su registro permite conocer la duración de las principales operaciones desarrolladas mediante la CNC.

La medición comienza al iniciar cada archivo de mecanizado y finaliza cuando la máquina completa la operación correspondiente. Para mantener un registro más ordenado se consideran por separado los tiempos de aislamiento de pistas, perforación y corte del contorno.

El tiempo total de mecanizado puede obtenerse mediante la suma de las tres operaciones.

$$Tm = Ta + Tp + Tc \quad (14)$$

Donde:

Tm = tiempo total de mecanizado.

Ta = tiempo empleado en el aislamiento de pistas.

Tp = tiempo empleado en la perforación.

Tc = tiempo empleado en el corte del contorno.

Todos los valores deben expresarse en una misma unidad.

Operación	**Instrumento**	**Unidad**	**Tiempo registrado**
Aislamiento de pistas	Cronómetro	min:s	8:42
Perforación	Cronómetro	min:s	3:18
Corte del contorno	Cronómetro	min:s	4:25
Tiempo total	Cálculo	min:s	16:25

Tabla 34. Registro del tiempo durante la fabricación de la PCB

9.1.5.3 *Montaje de los componentes del detector de fase*

Una vez comprobadas las características físicas de la PCB se realiza la colocación de los componentes correspondientes al detector de fase. La posición de cada elemento se establece de acuerdo con el diseño desarrollado previamente en Proteus 8.17.

Antes del montaje se revisan las referencias y orientación de aquellos componentes que presentan polaridad o posición definida. También se comprueba que los terminales coincidan con las perforaciones y pads presentes en la placa.

El sujetador ajustable de PCB se utiliza como apoyo para mantener la placa estable durante esta actividad. Su uso facilita el trabajo con componentes pequeños y reduce el movimiento de la placa durante el montaje.

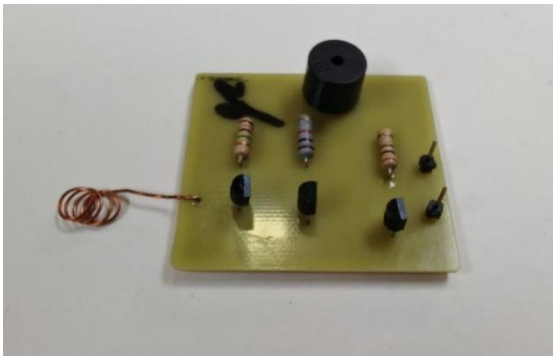


Figura 54. Colocación de los componentes del detector de fase sobre la PCB.

N.º	**Referencia**	**Componente**	**Valor o característica**	**Cantidad**	**Tecnología**
1	R1	Resistencia	4,05 MΩ	1	THT
2	R2	Resistencia	40,5 kΩ	1	THT
3	R3	Resistencia	340 Ω	1	THT
4	Q1	Transistor NPN	2N3904	1	THT
5	Q2	Transistor NPN	2N3904	1	THT
6	Q3	Transistor NPN	2N3904	1	THT
7	D1	LED rojo	Indicador visual	1	THT
		TOTAL		**7**	

Tabla 35. Componentes empleados en la PCB del detector de fase

9.1.5.4 *Soldadura de los componentes*

Después del montaje se realiza la unión de los terminales con los pads de la PCB. Para esta actividad se emplea la estación YIHUA YH98 2 en 1, la cual integra cautín y pistola de aire caliente con controles independientes. El manual del equipo identifica pantalla y regulación de temperatura para ambos sistemas, además del control del flujo de aire para la pistola de retrabajo.

La herramienta utilizada depende de la tecnología de montaje presente en el detector de fase. Para componentes de orificio pasante puede utilizarse principalmente el cautín, mientras que el sistema de aire caliente queda disponible cuando se empleen componentes de montaje superficial o se necesite retrabajo.

Durante el procedimiento debe evitarse una exposición prolongada al calor, ya que una temperatura excesiva puede afectar pads, pistas o componentes. El manual de la estación también presenta recomendaciones de seguridad y mantenimiento para la punta del cautín y el sistema de aire caliente.

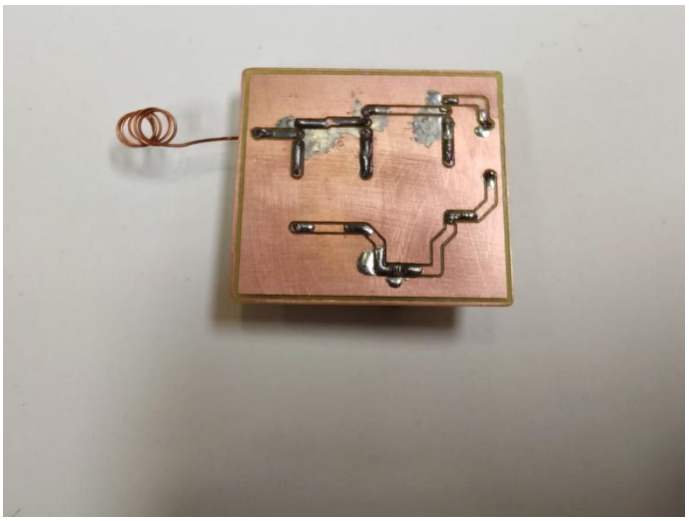


Figura 55. Proceso de soldadura de los componentes del detector de fase.

Parámetro	Valor o característica
Equipo	YIHUA YH98 2 en 1
Herramienta utilizada	Cautín / aire caliente
Temperatura configurada	350 °C
Tipo de soldadura	Estaño para soldadura electrónica
Flux utilizado	Flux para soldadura electrónica
Tecnología de montaje	THT
Tiempo aproximado del proceso	12 min

Tabla 36. Parámetros registrados durante el proceso de soldadura

9.1.5.5 *Inspección visual y óptica*

Después de la soldadura se realiza una primera revisión visual de la placa y posteriormente una inspección ampliada mediante el microscopio digital DM7-Z33.

El equipo dispone de pantalla integrada, rueda de enfoque, iluminación LED, ranura para tarjeta de memoria y conexión Tipo-C. Estas características permiten observar zonas pequeñas de la PCB y conservar fotografías de las áreas inspeccionadas cuando sea necesario.

La inspección se concentra principalmente en el estado de las pistas, pads, terminales y uniones soldadas. También se revisa la posible presencia de puentes de soldadura, daños físicos, residuos conductores o componentes colocados de forma incorrecta.



Figura 56. Inspección de la PCB del detector de fase mediante microscopio digital.

Elemento inspeccionado	**Criterio de aceptación**	**Registro**
Pistas	Sin interrupciones visibles	Cumple
Separación entre pistas	Sin uniones de cobre no previstas	Cumple
Pads	Sin desprendimientos o daños visibles	Cumple
Perforaciones	Sin daños alrededor del orificio	Cumple
Componentes	Ubicación y orientación acorde con el diseño	Cumple
Uniones soldadas	Contacto visible entre terminal y pad	Cumple
Terminales cercanos	Ausencia de puentes de soldadura	Cumple
Superficie	Sin residuos conductores visibles	Cumple

Tabla 37. Criterios empleados durante la inspección de la PCB

9.1.5.6 *Comprobación eléctrica de la PCB*

Después de la inspección visual se realizan las comprobaciones eléctricas mediante un multímetro digital. Estas pruebas permiten revisar las conexiones presentes antes de efectuar la prueba funcional del detector de fase.

En primer lugar, se verifica la continuidad de las pistas principales del circuito. Las puntas del multímetro se colocan en puntos pertenecientes a una misma conexión y se observa la respuesta del instrumento.

Posteriormente se comprueba la ausencia de continuidad entre redes que deben permanecer separadas. Esta prueba ayuda a identificar posibles cortocircuitos causados por residuos de cobre o puentes de soldadura.

También se revisan las líneas de alimentación y aquellos puntos del circuito que resulten necesarios según el esquema del detector de fase.

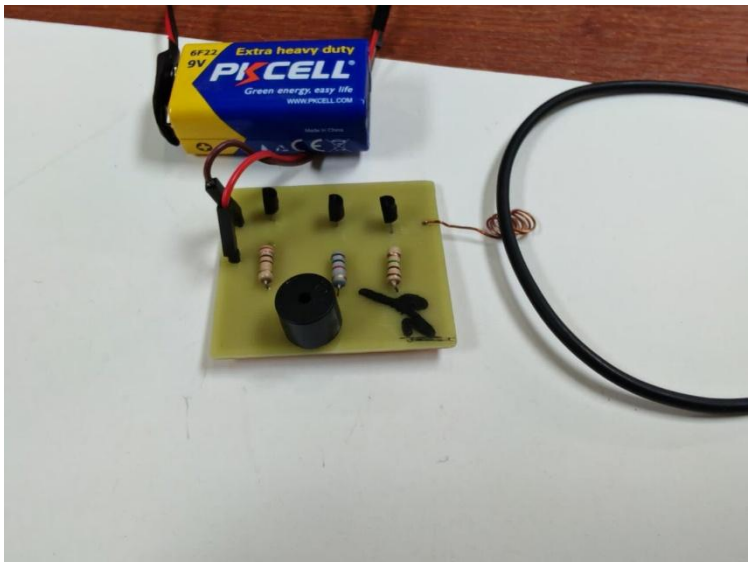


Figura 57. Comprobación de continuidad en la PCB del detector de fase.

Prueba	**Instrumento**	**Condición evaluada**	**Criterio**
Continuidad de pistas	Multímetro	Conexión entre puntos de una misma red	Presencia de continuidad
Cortocircuito	Multímetro	Conexión entre redes independientes	Ausencia de continuidad
Línea de alimentación	Multímetro	Continuidad de la alimentación	Conexión según diseño
Resistencia	Multímetro	Valor de componentes o conexiones seleccionadas	Valor acorde con el circuito
Tensión	Multímetro	Nivel en puntos definidos	Valor acorde con el diseño

Tabla 38. Pruebas eléctricas aplicadas al detector de fase

9.1.5.7 *Prueba funcional del detector de fase*

Una vez concluidas la inspección y las comprobaciones eléctricas se realiza la prueba funcional del circuito. Esta actividad permite conocer si la PCB fabricada y ensamblada presenta la respuesta prevista en el diseño.

Antes de aplicar alimentación se comprueba nuevamente que no existan cortocircuitos entre las líneas principales. La fuente utilizada y las condiciones eléctricas deben corresponder con las definidas en el circuito del detector de fase.

Durante la prueba se observa la respuesta del elemento de indicación o salida incluido en el diseño cuando se presenta la condición de fase que el circuito debe reconocer.

Los valores de tensión y las condiciones exactas de funcionamiento se incorporarán de acuerdo con el esquema definitivo del detector de fase.

Condición de prueba	**Respuesta esperada**	**Instrumento o medio de verificación**
Circuito sin alimentación	Ausencia de respuesta activa	Observación
Alimentación aplicada	Circuito energizado sin comportamiento anormal	Multímetro / observación
Condición de fase detectada	Respuesta prevista por el diseño	Elemento indicador del circuito
Condición sin detección	Respuesta correspondiente al estado normal	Elemento indicador del circuito

Tabla 39. Criterios establecidos para la prueba funcional

Etapa	**Criterio de verificación**	**Evidencia**	**Resultado**
Diseño esquemático	Circuito desarrollado en Proteus 8.17	Captura del esquema	Cumple
Diseño PCB	Pistas, pads y perforaciones definidas	Captura del PCB	Cumple
Archivos de fabricación	Gerber y Excellon generados	Archivos o captura	Cumple
Procesamiento CAM	Trayectorias generadas en FlatCAM	Captura	Cumple
Código G	Archivos CNC generados	Archivo o captura	Cumple
Comunicación CNC	Candle y controladora conectados	Estado del software	Cumple
Fresado	Pistas mecanizadas	PCB o fotografía	Cumple
Perforación	Orificios realizados	PCB o medición	Cumple
Corte	Contorno obtenido	PCB o fotografía	Cumple
Montaje	Componentes colocados según diseño	Fotografía	Cumple
Soldadura	Terminales unidos a los pads	Inspección	Cumple
Inspección óptica	Ausencia de defectos críticos visibles	Microscopio	Cumple

Etapa	Criterio de verificación	Evidencia	Resultado
Continuidad	Redes correspondientes conectadas	Multímetro	Cumple
Cortocircuito	Redes independientes sin unión	Multímetro	Cumple
Funcionamiento	Detector de fase presenta la respuesta prevista	Prueba funcional	Cumple

Tabla 40. Matriz de verificación funcional de la estación integral

10 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos durante la fabricación y ensamblaje de la PCB correspondiente al detector de fase. El análisis considera las diferentes etapas desarrolladas en la estación integral, desde el mecanizado de la placa hasta la comprobación final del funcionamiento del circuito.

Los resultados se organizan de acuerdo con los parámetros establecidos previamente en la metodología. Para la etapa de mecanizado se consideran principalmente el ancho de las pistas, diámetro de los orificios y tiempo de manufactura. Estos indicadores también se encuentran establecidos en la matriz de operacionalización del proyecto.

Posteriormente se presentan los resultados relacionados con el montaje de los componentes, soldadura, inspección óptica y pruebas eléctricas. La información obtenida permite establecer si la estación reúne las condiciones necesarias para desarrollar el proceso completo de fabricación y ensamblaje de una placa de circuito impreso.

10.1 Validación experimental de la estación integral

La validación experimental se desarrolló mediante la fabricación de una PCB correspondiente a un detector de fase. Para ello se emplearon las diferentes áreas y equipos incorporados en la estación, siguiendo la secuencia establecida durante la metodología.

La evaluación no se concentra únicamente en el funcionamiento de la máquina CNC. También comprende el estado físico de la placa mecanizada, montaje de los componentes, calidad visual de las uniones soldadas, continuidad de las conexiones y respuesta funcional del circuito.

Este procedimiento mantiene relación con el tercer objetivo específico del proyecto, donde se establece la fabricación y ensamblaje de una PCB de prueba como medio para comprobar la operatividad de la estación.

10.1.1 Resultados del ancho de las pistas

Una vez concluido el mecanizado y limpieza de la PCB, se realizaron mediciones sobre varias pistas del detector de fase. Los puntos seleccionados correspondieron a zonas donde el ancho podía medirse con mayor claridad.

El valor establecido durante el diseño en Proteus 8.17 fue de 1.5 mm. Posteriormente se registraron las dimensiones obtenidas sobre la placa mecanizada y se compararon con este valor.

Medición	**Valor de diseño (mm)**	**Valor medido (mm)**	**Diferencia (mm)**
Pista 1	1,50	1,48	0,02
Pista 2	1,50	1,52	0,02
Pista 3	1,50	1,47	0,03
Pista 4	1,50	1,51	0,01
Pista 5	1,50	1,49	0,01
Promedio	1,50	1,494	0,018

Tabla 41. Resultados de la medición del ancho de las pistas

$$D = |Vd - Vm| \quad (15)$$

Donde:

D = diferencia dimensional, en mm.

Vd = valor establecido en el diseño, en mm.

Vm = valor obtenido mediante medición, en mm.

De acuerdo con los datos registrados, el ancho promedio obtenido fue de 1.494 mm, frente a un valor de diseño de 1.5 mm, lo que representa una diferencia de 0.018 mm.

10.1.2 Resultados del diámetro de los orificios

El segundo parámetro dimensional corresponde al diámetro de los orificios empleados para el montaje de los componentes del detector de fase.

Los diámetros deben mantener relación con los terminales de los componentes, ya que un orificio demasiado pequeño dificulta su inserción, mientras que uno excesivamente grande puede reducir la superficie disponible alrededor del pad.

Medición	**Diámetro de diseño (mm)**	**Diámetro medido (mm)**	**Diferencia (mm)**
Orificio 1	0,90	0,89	0,01
Orificio 2	0,90	0,91	0,01
Orificio 3	0,90	0,88	0,02
Orificio 4	0,90	0,92	0,02
Orificio 5	0,90	0,90	0,00
Promedio	**0,90**	**0,900**	**0,012**

Tabla 42. Resultados de la medición de los orificios de la PCB

Las mediciones mostraron un diámetro promedio de 0.9 mm, comparado con el valor establecido de 0.88 mm. La diferencia promedio correspondió a 0.92 mm.

Además del valor dimensional, durante el montaje debe observarse si los terminales ingresan correctamente y si los pads conservan suficiente superficie alrededor de las perforaciones.

10.1.3 Resultados del tiempo de manufactura

El tiempo de manufactura se registró por separado para las operaciones de aislamiento de pistas, perforación y corte del contorno. Esta división permite conocer cuál de las operaciones representa una mayor parte del tiempo empleado durante la fabricación.

Operación	**Tiempo**
Aislamiento de pistas	8:42 min:s
Perforación	3:18 min:s
Corte del contorno	4:25 min:s
Tiempo total de mecanizado	16:25 min:s

Tabla 43. Tiempo registrado durante el mecanizado del detector de fase

El aislamiento de pistas presentó un tiempo de 8 minutos con 42 segundos, mientras que la perforación requirió 3 minutos con 18 segundos y el corte del contorno 4 minutos con 25

segundos. La suma de las tres operaciones dio como resultado un tiempo total de mecanizado de 16 minutos con 25 segundos.

10.1.4 Resultados del montaje y soldadura

Después del mecanizado se colocaron los componentes correspondientes al detector de fase según la distribución establecida en Proteus 8.17. Durante el montaje se revisó principalmente la coincidencia entre terminales, perforaciones y pads.

El proceso de soldadura se desarrolló mediante la estación YIHUA YH98 2 en 1. La temperatura utilizada durante el procedimiento fue de 350 °C, con una tecnología de montaje THT.

Después de concluir las uniones se revisó el estado general de la placa. Los criterios considerados fueron la unión entre terminal y pad, cantidad de soldadura, ausencia de puentes y estado físico de la superficie.

Parámetro evaluado	**Resultado observado**	**Evaluación**
Posición de componentes	Los componentes se encontraron colocados de acuerdo con la distribución definida en el diseño de la PCB	Cumple
Inserción de terminales	Los terminales atravesaron correctamente las perforaciones sin necesidad de ampliar los orificios	Cumple
Unión terminal-pad	Se observó contacto adecuado entre los terminales y los pads mediante las uniones soldadas	Cumple
Cantidad de soldadura	La cantidad aplicada permitió formar las uniones sin acumulaciones excesivas	Cumple
Puentes de soldadura	No se observaron conexiones de soldadura no previstas entre terminales cercanos	Cumple
Estado de pads	Los pads permanecieron adheridos a la PCB, sin desprendimientos ni daños visibles	Cumple

Tabla 44. Resultados del montaje y soldadura del detector de fase

10.1.5 Resultados de la inspección óptica

La inspección mediante el microscopio digital permitió observar con mayor detalle las pistas, pads y uniones soldadas del detector de fase. La revisión se realizó después del ensamblaje con el propósito de identificar posibles defectos difíciles de reconocer a simple vista.

Se consideraron principalmente interrupciones sobre las pistas, residuos conductores, daños en pads, exceso o falta de soldadura y puentes entre terminales.

Elemento inspeccionado	**Condición observada**	**Resultado**
Pistas	Se observaron continuas y sin interrupciones visibles en su recorrido	Cumple
Separación entre pistas	Se mantuvo separación visible entre conductores independientes, sin uniones de cobre no previstas	Cumple
Pads	Se observaron completos y adheridos a la placa, sin desprendimientos visibles	Cumple
Perforaciones	Los bordes de los orificios se encontraron definidos y sin daños visibles alrededor de los pads	Cumple
Uniones soldadas	Se observó contacto entre los terminales y los pads, con distribución adecuada de soldadura	Cumple
Puentes de soldadura	No se identificaron puentes entre terminales o pads cercanos	Cumple
Residuos conductores	No se observaron residuos metálicos o conductores sobre la superficie de la PCB	Cumple

Tabla 45. Resultados de la inspección óptica del detector de fase

10.1.6 Resultados de las comprobaciones eléctricas

Después de la inspección óptica se realizaron las comprobaciones eléctricas mediante multímetro. Las pruebas se concentraron en la continuidad de las pistas, ausencia de cortocircuitos y estado de las conexiones principales.

La metodología planteada en el proyecto establece el uso del multímetro y microscopio digital como recursos para comprobar aislamiento entre pistas, ausencia de cortocircuitos y paso correcto de la señal.

Prueba	Punto o zona evaluada	Resultado obtenido	Evaluación
Continuidad	Línea de alimentación positiva	Se presentó continuidad entre los puntos pertenecientes a la misma red	Cumple
Continuidad	Línea común o negativa del circuito	Se presentó continuidad entre los puntos pertenecientes a la misma red	Cumple
Cortocircuito	Alimentación	No se presentó continuidad entre los terminales positivo y negativo	Cumple
Cortocircuito	Pistas independientes	No se presentó continuidad entre redes que debían permanecer separadas	Cumple
Tensión	Entrada de alimentación de la PCB	8,96 V	Cumple
Tensión	Línea de alimentación del circuito	8,91 V	Cumple

Tabla 46. Resultados de las comprobaciones eléctricas

Las pruebas de continuidad mostraron una conexión eléctrica correcta entre los puntos pertenecientes a una misma red. Por otra parte, entre las redes que debían permanecer separadas no se detectó continuidad directa entre positivo y negativo., lo cual permitió establecer ausencia de cortocircuitos.

10.1.7 Resultado de la prueba funcional del detector de fase

La última prueba experimental corresponde al funcionamiento del detector de fase. Esta prueba permite comprobar el resultado conjunto de las etapas anteriores, debido a que una falla en las pistas, montaje, soldadura o conexiones puede afectar directamente la respuesta del circuito.

La prueba se realizó bajo las condiciones eléctricas establecidas en el diseño. Al aplicar la condición correspondiente el circuito respondió mediante el encendido del LED, lo cual indicó la detección de la señal prevista. Al retirar dicha condición, el LED permaneció apagado, mostrando que el circuito diferenciaba entre la presencia y ausencia de la señal de detección.

Condición aplicada	Respuesta esperada	Respuesta obtenida	Resultado
Circuito energizado	El circuito recibe alimentación y permanece disponible para la detección	El circuito recibió alimentación de 9 V sin presentar comportamiento anormal	Cumple
Presencia de fase	Activación del indicador visual	El LED rojo se encendió al detectar la condición de fase	Cumple
Ausencia de fase	Indicador visual desactivado	El LED rojo permaneció apagado al retirar la condición de fase	Cumple

Tabla 47. Resultados de la prueba funcional del detector de fase

10.2 Evaluación funcional de la estación integral

Después de las pruebas individuales se realizó una evaluación general de la estación. Esta revisión permite establecer si cada una de las etapas necesarias para obtener el detector de fase pudo desarrollarse mediante los equipos incorporados.

Para la evaluación se consideraron las etapas de diseño, preparación de archivos, control CNC, mecanizado, ensamblaje, soldadura, inspección y comprobación eléctrica.

Etapa	**Evidencia obtenida**	**Resultado**
Diseño esquemático en Proteus 8.17	Esquema del detector de fase	Cumple
Diseño PCB	Distribución de pistas y pads	Cumple
Archivos Gerber y Excellon	Archivos generados	Cumple
Procesamiento en FlatCAM	Trayectorias generadas	Cumple
Código G	Archivos CNC obtenidos	Cumple
Comunicación mediante Candle	CNC conectada y operativa	Cumple
Aislamiento de pistas	PCB mecanizada	Cumple
Perforación	Orificios obtenidos	Cumple
Corte	Contorno terminado	Cumple
Montaje	Componentes colocados	Cumple
Soldadura	Uniones realizadas	Cumple
Inspección	PCB revisada mediante microscopio	Cumple
Verificación eléctrica	Continuidad y ausencia de cortocircuitos	Cumple
Funcionamiento final	Detector de fase operativo	Cumple

Tabla 48. Resultados de la evaluación funcional de la estación integral

$$C = \left(\frac{Nc}{Nt}\right) * 100 \quad (16)$$

Donde:

C = porcentaje de cumplimiento.

Nc = número de criterios cumplidos.

Nt = número total de criterios evaluados.

10.2.1 Respuesta a la pregunta científica

La pregunta científica planteada en el proyecto busca establecer en qué medida la implementación de la estación integral permite desarrollar los procesos de mecanizado, montaje, soldadura, inspección y verificación eléctrica necesarios para obtener una placa de circuito impreso.

Los resultados experimentales permitieron comprobar que la estación integral puede desarrollar de manera secuencial las diferentes etapas necesarias para fabricar y ensamblar una PCB. Durante el mecanizado del detector de fase se obtuvo un ancho promedio de pista de 1,494 mm, frente al valor de diseño de 1,50 mm, con una diferencia promedio de 0,018 mm. En las perforaciones se obtuvo un diámetro promedio de 0,900 mm, correspondiente al valor nominal de 0,90 mm establecido para el proceso.

El tiempo total registrado durante el mecanizado fue de 16 minutos con 25 segundos, equivalente a 985 segundos. Dentro de este tiempo, el aislamiento de pistas requirió 8 minutos con 42 segundos, la perforación 3 minutos con 18 segundos y el corte del contorno 4 minutos con 25 segundos.

En la etapa de ensamblaje se colocaron los siete componentes THT correspondientes al detector de fase, manteniendo la distribución establecida en el diseño. Posteriormente, el proceso de soldadura permitió obtener uniones entre los terminales y los pads sin observar desprendimientos, acumulaciones excesivas o puentes de soldadura.

La inspección mediante el microscopio digital permitió comprobar el estado de las pistas, pads, perforaciones y uniones soldadas. Los siete criterios considerados durante esta revisión presentaron cumplimiento, sin observarse interrupciones visibles en las pistas, daños importantes en los pads, puentes de soldadura o residuos conductores.

Por otra parte, las comprobaciones realizadas mediante multímetro mostraron continuidad en las redes donde debía existir conexión eléctrica y ausencia de continuidad entre las pistas independientes. También se registraron 8,96 V en la entrada de alimentación y 8,91 V en la línea de alimentación del circuito, valores próximos a los 9 V suministrados al detector.

Finalmente, durante la prueba funcional, el detector de fase respondió de acuerdo con el comportamiento establecido en el diseño. Ante la presencia de la condición de fase, el LED

rojo se encendió como indicador visual, mientras que al retirar dicha condición permaneció apagado. De esta manera, las pruebas permitieron comprobar no solamente la fabricación física de la PCB, sino también su funcionamiento después del montaje y soldadura.

La evaluación general de la estación presentó 14 criterios cumplidos de un total de 14 evaluados, equivalente a un 100 % de cumplimiento. Por lo tanto, en respuesta a la pregunta científica, se determina que la implementación de la estación integral permitió desarrollar adecuadamente los procesos de mecanizado, montaje, soldadura, inspección y verificación eléctrica requeridos para la fabricación y ensamblaje de la PCB utilizada como circuito de prueba.

Estos resultados también muestran que los equipos y programas incorporados trabajaron de manera complementaria dentro de una misma secuencia de fabricación, desde el diseño digital hasta la comprobación funcional del circuito terminado. Esto responde directamente a lo que el documento exige completar antes de pasar al apartado de discusión de resultados.

10.3 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos deben analizarse considerando tanto los valores establecidos durante el diseño como el comportamiento observado en las diferentes etapas de fabricación y ensamblaje.

En relación con el mecanizado, la comparación entre el ancho diseñado y el valor obtenido permite establecer el nivel de correspondencia alcanzado por la CNC. De igual manera, las mediciones de los orificios permiten determinar si el proceso de perforación produjo dimensiones adecuadas para el montaje de los componentes.

El tiempo registrado durante el aislamiento, perforación y corte permite conocer la duración real de la fabricación del detector de fase y reconocer cuál operación representa una mayor parte del proceso.

La inspección óptica complementa las mediciones dimensionales debido a que permite reconocer defectos físicos que no siempre pueden expresarse mediante un valor numérico. Por su parte, las pruebas de continuidad y ausencia de cortocircuitos aportan información sobre el estado eléctrico de las conexiones.

La prueba funcional representa la evaluación final del conjunto. El funcionamiento del detector de fase depende de que el diseño, mecanizado, ensamblaje y soldadura mantengan las

conexiones previstas. Por este motivo, su respuesta permite relacionar los resultados de las diferentes etapas y establecer el comportamiento general de la estación integral.

La discusión definitiva deberá incorporar los valores obtenidos durante las pruebas y explicar las diferencias encontradas entre el diseño y la placa real. También se deberán señalar posibles causas de las desviaciones, como profundidad de mecanizado, diámetro de herramienta, fijación de la placa, ajuste del eje Z o condiciones durante la soldadura, únicamente cuando estas situaciones hayan sido observadas durante las pruebas.

11 IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES Y ECONÓMICOS)

La implementación de la estación integral para la fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso incorpora dentro del laboratorio de Electromecánica un espacio destinado al desarrollo de las diferentes etapas que intervienen en la obtención de una PCB. La estación reúne equipos para diseño, mecanizado CNC, montaje, soldadura, inspección y comprobación eléctrica, lo cual permite desarrollar estas actividades dentro de un mismo entorno de trabajo.

A partir de la integración de los equipos y del proceso de validación mediante la PCB del detector de fase, se consideran impactos relacionados con el aspecto técnico, social y económico del proyecto.

11.1 Impacto técnico

Desde el punto de vista técnico, el proyecto permite integrar diferentes equipos y herramientas utilizados durante la fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso. La estación reúne la máquina CNC Genmitsu 3018-PRO, computadora, estación de soldadura y aire caliente, sujetador para PCB, microscopio digital, multímetro y herramientas auxiliares.

El proceso también incorpora diferentes programas que intervienen de manera secuencial. Proteus 8.17 permite desarrollar el esquema electrónico y el diseño físico de la PCB; FlatCAM 8.993 Beta se utiliza para preparar las trayectorias de mecanizado y el código G; mientras que Candle GRBL permite establecer la comunicación y control de la máquina CNC.

Esta integración permite cubrir dentro de un mismo proceso las etapas de diseño, preparación de archivos, aislamiento de pistas, perforación, corte, montaje de componentes, soldadura, inspección óptica y comprobación eléctrica. Estas actividades coinciden con el objetivo establecido para la estación, donde se plantea integrar los equipos y garantizar su instalación y operatividad dentro del laboratorio.

La fabricación del detector de fase como circuito de prueba permite comprobar el trabajo conjunto de los equipos que forman parte de la estación. Además, las mediciones del ancho de las pistas, diámetro de los orificios y tiempo de manufactura aportan información sobre el comportamiento del proceso CNC, mientras que la inspección y las pruebas eléctricas permiten revisar el estado final de la placa.

Otro aporte técnico corresponde a la disponibilidad de un proceso de fabricación mediante mecanizado CNC, con el cual el diseño electrónico puede pasar desde un archivo digital hasta una placa física preparada para el montaje de componentes. De esta manera, el laboratorio dispone de un recurso que complementa las prácticas realizadas mediante simuladores, protoboards y placas perforadas.

11.2 Impacto social

En el ámbito social y académico, la estación constituye un recurso que puede apoyar las actividades prácticas desarrolladas dentro de la carrera de Ingeniería Electromecánica. Su disponibilidad permite que los estudiantes tengan contacto con diferentes etapas relacionadas con el desarrollo de circuitos electrónicos, desde el diseño inicial hasta la obtención y comprobación de una PCB física.

Los beneficiarios principales identificados en el proyecto corresponden a estudiantes de segundo y cuarto semestre, debido a su relación con las asignaturas de Circuitos Eléctricos y Electrónica. El documento registra 29 estudiantes de segundo semestre y 19 de cuarto semestre, para un total de 48 beneficiarios principales.

La estación también puede beneficiar posteriormente a estudiantes de otros niveles mediante prácticas, proyectos de investigación, trabajos de titulación y actividades relacionadas con electrónica, automatización, microcontroladores y desarrollo de prototipos. De igual manera, los docentes pueden disponer de este espacio como apoyo durante actividades que relacionen los contenidos teóricos con procedimientos prácticos.

La incorporación de la estación amplía las posibilidades de trabajo dentro del laboratorio, ya que anteriormente las actividades estaban concentradas principalmente en simulaciones, protoboards y placas perforadas, sin contar con un espacio integrado para fabricar una PCB diseñada por los propios estudiantes. Esta necesidad se encuentra identificada en el problema de investigación del proyecto.

Además de las prácticas académicas, la estación puede utilizarse en casas abiertas, ferias y actividades demostrativas donde se presenten las etapas de diseño, fabricación y ensamblaje de circuitos impresos. Esto permite mostrar aplicaciones relacionadas con electrónica y manufactura CNC dentro de la formación en Ingeniería Electromecánica.

No se establece en este proyecto un porcentaje de mejora del aprendizaje de los estudiantes, debido a que la validación se concentra en el funcionamiento técnico de la estación y no contempla una evaluación educativa mediante pretest o postest.

11.3 Impacto económico

Desde el punto de vista económico, la estación concentra diferentes recursos dentro de un mismo espacio de trabajo. La disponibilidad de equipos para mecanizado, soldadura, inspección y comprobación permite aprovechar una misma infraestructura durante distintas actividades relacionadas con la fabricación y ensamblaje de PCB.

Uno de los aspectos considerados desde el planteamiento del proyecto es la disminución de la dependencia de servicios externos para obtener placas de circuito impreso. El documento identifica que anteriormente el laboratorio no disponía de una estación integral para llevar un diseño electrónico hasta una PCB fabricada físicamente y tampoco contaba localmente con un servicio especializado para cubrir este proceso.

La fabricación de placas dentro del laboratorio permite aprovechar los equipos disponibles durante prácticas académicas, proyectos estudiantiles y futuros trabajos de investigación. De esta manera, la inversión realizada no queda limitada a la fabricación del detector de fase utilizado durante la validación, sino que la estación puede continuar en funcionamiento para diferentes circuitos y aplicaciones.

Este criterio mantiene una lógica semejante a la utilizada en la tesis guía, donde el impacto económico se relaciona con el aprovechamiento de una misma inversión para distintas actividades y con la posibilidad de reutilizar el sistema en futuras prácticas y proyectos.

12 PRESUPUESTO DEL PROYECTO

Para la implementación de la estación integral para la fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso se consideran los equipos, herramientas, materiales e insumos utilizados durante las etapas de mecanizado, montaje, soldadura, inspección y comprobación eléctrica.

El presupuesto incluye los elementos que forman parte directamente de la estación y los materiales empleados durante la fabricación de la PCB del detector de fase.

Cantidad	Detalle	Precio unitario (USD)	Total (USD)
1	CNC Genmitsu 3018-PRO	420,00	420,00
1	Estación de soldadura y aire caliente YIHUA YH98 2 en 1	190,00	190,00
1	Microscopio digital DM7-Z33	135,00	135,00
1	Sujetador ajustable para PCB	55,00	55,00
1	Multímetro digital	65,00	65,00
1	Juego de fresas tipo V para aislamiento de pistas	38,00	38,00
1	Juego de brocas para perforación de PCB	32,00	32,00
1	Juego de fresas para corte o perfilado	36,00	36,00
5	Placa revestida de cobre para fabricación de PCB	12,00	60,00
1	Estaño para soldadura electrónica	24,00	24,00
1	Flux para soldadura	12,00	12,00
1	Juego de herramientas auxiliares	140,00	140,00
1	Componentes electrónicos para el detector de fase	25,00	25,00
1	Materiales para organización y acondicionamiento de la estación	170,00	170,00
1	Transporte y logística	68,00	68,00
1	Impresiones y documentación técnica	30,00	30,00
	TOTAL		**1.500,00**

Tabla 49. Presupuesto de implementación de la estación integral para fabricación y ensamblaje de PCB

13 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

13.1 Conclusiones

- El análisis de los fundamentos relacionados con la fabricación y ensamblaje de placas de circuito impreso permitió establecer la base técnica necesaria para el desarrollo del proyecto. Se estudiaron los procesos de diseño de PCB, mecanizado mediante CNC,

generación de archivos Gerber y código G, montaje de componentes, soldadura, inspección óptica y comprobación eléctrica. Estos conocimientos permitieron definir la secuencia de trabajo y seleccionar los recursos necesarios para la implementación de la estación integral.

- Se integraron los equipos y herramientas necesarios para conformar la estación de fabricación y ensamblaje de PCB dentro del laboratorio de Electromecánica. La estación quedó compuesta por la máquina CNC Genmitsu 3018-PRO, la estación de soldadura YIHUA YH98 2 en 1, el microscopio digital DM7-Z33, el sujetador para PCB, el multímetro digital y las herramientas auxiliares. Además, el uso conjunto de Proteus 8.17, FlatCAM 8.993 Beta y Candle GRBL permitió establecer un flujo de trabajo desde el diseño electrónico hasta la fabricación física y comprobación de la placa.
- La validación de la estación se realizó mediante la fabricación y ensamblaje de una PCB correspondiente a un detector de fase. Durante el mecanizado se obtuvo un ancho promedio de pista de 1,494 mm, frente al valor de diseño de 1,50 mm, y un diámetro promedio de perforación de 0,900 mm, correspondiente al valor nominal establecido de 0,90 mm. El tiempo total de mecanizado fue de 16 minutos con 25 segundos. Estos resultados mostraron que las operaciones de aislamiento, perforación y corte pudieron ejecutarse de acuerdo con las condiciones definidas para la fabricación de la placa.
- En las etapas de montaje, soldadura e inspección óptica se obtuvo cumplimiento en los criterios evaluados, sin observarse daños importantes en pistas y pads, puentes de soldadura ni residuos conductores que afectaran la PCB. Las comprobaciones mediante multímetro mostraron continuidad en las conexiones correspondientes y ausencia de cortocircuitos entre redes independientes. Finalmente, el detector de fase respondió de acuerdo con el funcionamiento previsto, activando el LED ante la condición de detección y manteniéndolo apagado en ausencia de esta. La evaluación general presentó 14 criterios cumplidos de 14 evaluados, equivalente al 100 %, lo que permitió establecer que la estación integral cumple con las etapas previstas para la fabricación y ensamblaje de una PCB de prueba.

13.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar una revisión periódica de la máquina CNC, especialmente del sistema de sujeción, husillo, portaherramientas, movimiento de los ejes y conexiones eléctricas. Antes de cada mecanizado también debe verificarse el punto cero de los ejes

X, Y y Z, así como los parámetros de profundidad, avance y herramienta utilizada, con el fin de reducir errores durante la fabricación de la PCB.

- Durante el montaje y soldadura se recomienda controlar la temperatura de trabajo de acuerdo con los componentes utilizados, mantener limpia la punta del cautín y evitar una exposición prolongada al calor. Una vez finalizada la soldadura, debe realizarse una inspección visual y mediante microscopio digital para identificar posibles daños en pistas, pads, uniones o puentes de soldadura.
- Antes de energizar una PCB ensamblada se recomienda comprobar mediante multímetro la continuidad de las pistas y la ausencia de cortocircuitos entre las líneas que deben permanecer separadas. Esta revisión debe realizarse como paso previo a la prueba funcional del circuito, con el propósito de reducir el riesgo de daños en los componentes.
- Se recomienda mantener la estación disponible para futuras prácticas académicas, proyectos de investigación y trabajos de titulación. También resulta conveniente fabricar diferentes tipos de circuitos y evaluar nuevos anchos de pista, diámetros de perforación, herramientas y parámetros de mecanizado, lo que permitirá ampliar las aplicaciones de la estación dentro del laboratorio de Electromecánica.

14 BIBLIOGRAFIA

[1] "What is a PCB? Everything You Need to Know | EI Microcircuits", https://www.eimicro.com/what-is-a-pcb-everything-you-need-to-know.

[2] ipcb, "Blog de PCB - Introducción a la CNC de PCB", https://www.ipcb.com/es/pcb-blog/10082.html.

[3] R. Salas, J. Fernando Pérez, y J. Ramírez, "TECNICAS DE DISEÑO, DESARROLLO Y MONTAJE DE CIRCUITOS IMPRESOS".

[4] "430707206-Manual-Plancha-Pcbs".

[5] "Comprender el grabado de PCB para crear placas de circuito impreso de alta calidad", https://www.pcbmay.com/es/grabado-de-pcb/.

[6] G. Astudillo Mendoza, "'CONTROL NUMERICO COMPUTARIZADO' Definición, conceptos básicos y tipos de máquinas CNC".

[7] dt360admin, “Qué es el CNC – control numérico por computadora | Mecasinc”, https://mecanizadossinc.com/blog/sistema-cnc-control-numerico-por-computadora/.

[8] “Alternatives to Gerber RS-274-X”, https://www.epdtonthenet.net/article/124342/Alternatives-to-Gerber-RS-274-X.aspx.

[9] “UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL DECLARACIÓN”.

[10] R. Shrestha, “Archivos Gerber en la Fabricación de Circuitos Impresos: Todo lo que necesita saber| FS Circuits”, https://www.fscircuits.com/es/gerber-file/.

[11] “Lista de códigos G del CNC: Comandos y funciones de programación”, https://espanol.norck.com/blogs/news/cnc-g-code-list-commands-and-programming-functions.

[12] J. Li, “Dominio de los códigos G y M en el mecanizado CNC”, https://firstmold.com/es/tips/g-code-and-m-code/.

[13] 托普法斯特, “Tecnología Through Hole PCB - Topfastpcb”, https://www.topfastpcb.com/es/blog/through-hole-technology-pcb/.

[14] R. Gonzalez, “4º Año ELECTRÓNICA”.

[15] J. Sepulveda, “Qué Velocidad y Avance en Tu CNC Router - Cimech 3d”, https://www.cimech3d.cl/que-velocidad-y-avance-usar-en-tu-cnc-router/.

[16] “Fórmulas de Corte para Fresado - Información Técnica / Fórmula de Corte | MITSUBISHI MATERIALS MÉXICO S.A.DE C.V.”, https://www.mmc-carbide.com/mx/technical_information/formula/tec_milling_formula.

[17] F. De *et al.*, “UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE”, 2023.

[18] C. Mecánica, “ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE MECÁNICA UNA TOLERANCIA DE ± 0.1 MM ORIENTADO A LA IMPLEMENTACIÓN DE COMPONENTES MONTADOS EN”, 2024.

[19] “04 MEC 268 TRABAJO GRADO”.

[20] “Fórmulas y definiciones de fresado”, https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/machining-formulas-definitions/milling-formulas-definitions.

[21] A. Wahjudi y M. Yusuf, “Analysis of Spindle Position Errors in a Retrofitted Three-Axis Training Unit CNC Machine using Statistical Methods”, en *Proceedings - International Seminar on Intelligent Technology and its Applications, ISITIA*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2025, pp. 76–81. doi: 10.1109/ISITIA66279.2025.11137536.

[22] L. Zhang, L. Jiang, L. Chen, Z. Wen, y J. Gao, “Lightweight and Accurate Printed Circuit Board Defect Detection Network Based on Cross-scale Feature Fusion”, en *Lecture Notes in Computer Science*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2027, pp. 352–363. doi: 10.1007/978-981-92-3504-9_29.

[23] Y. Sun *et al.*, “An executable machine-tool-level digital twin for closed-loop CNC milling”, *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 103, feb. 2027, doi: 10.1016/j.rcim.2026.103363.

[24] J. G. Jamnani, “Brushless Direct Current Motor”, en *Special Electrical Machinery*, wiley, 2024, pp. 1–14. doi: 10.1002/9781394193912.ch1.

[25] “Labcenter Electronics”, https://www.labcenter.com/.

[26] C. De y I. De Sistemas, “UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA CIVIL”.

[27] “3. Conceptos Básicos¶”, https://flatcam.org/manual/es/basics.html.

[28] “Candle Grbl software explanation and Tutorial”, https://cncphilosophy.com/candle-grbl-software-tutorial/.

[29] A. Ayodele, “PCB Manufacturing Process: A Comprehensive Guide to Understanding and Mastering the Techniques”, https://www.wevolver.com/article/pcb-manufacturing-process.

[30] IPC, “IPC-AJ-820A Assembly and Joining Handbook”, 2012, *Bannockburn, IL, USA*. [En línea]. Disponible en: https://www.ipc.org/TOC/IPC-AJ-820A.pdf

[31] HAKKO Corporation, “FR-850 Hot-Air SMD Rework Station”. [En línea]. Disponible en: https://www.hakko.com/english/products/hakko_fr850.html

[32] Kester, “Lead-Free Hand Soldering – Ending the Nightmares”. [En línea]. Disponible en: https://www.kester.com/Portals/0/Documents/Knowledge%20Base/Lead-free-Hand-Soldering.pdf

[33] HAKKO Corporation, “FX-951 Soldering Station”. [En línea]. Disponible en: https://www.hakko.com/english/products/hakko_fx951.html

[34] “Premium Rosin Soldering Flux Paste Kit | YX-20 80g, Broza, RMA-223 10CC, White Flux, HY510 Thermal Paste for PCB, BGA, SMD, Mobile & Electronics Repair by Electrica | Daraz.pk”. Consultado: el 17 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.daraz.pk/products/best-quality-rosin-soldering-paste-yx-20-80gm-broza-10cc-flux-type-rma-223-white-flux-solid-solder-paste-welding-fluxes-repair-soldering-welding-fluxes-repair-by-electrica-i265150550.html

[35] IPC, “Through-Hole Assembly Options for Mixed Technology Boards”, en *IPC Technical Resources*, [En línea]. Disponible en: https://www.ipc.org/system/files/technical_resource/E18%26S17-2.pdf

[36] HAKKO Corporation, “How to Make Maintenance and Inspections of Station-Type Soldering Irons”. [En línea]. Disponible en: https://www.hakko.com/english/support/maintenance/detail.php?seq=169

[37] HAKKO Corporation, “Desoldering / Rework”. [En línea]. Disponible en: https://www.hakko.com/english/products/category_detail/?seq=18

[38] IPC, “IPC-A-610G: Acceptability of Electronic Assemblies”, *Bannockburn, IL, USA*. [En línea]. Disponible en: https://www.ipc.org/TOC/IPC-A-610G.pdf

[39] IPC, “IPC-A-610J: Acceptability of Electronic Assemblies”, marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.ipc.org/TOC/IPC-A-610J_TOC.pdf

[40] Leica Microsystems, “PCB Inspection Microscopy Solutions”. [En línea]. Disponible en: https://www.leica-microsystems.com/applications/industrial-microscopy-markets/electronics-semiconductor/pcb-inspection/

[41] J. Kim, J. Ko, H. Choi, y H. Kim, “Printed Circuit Board Defect Detection Using Deep Learning via a Skip-Connected Convolutional Autoencoder”, *Sensors*, vol. 21, núm. 15, p. 4968, 2021, doi: 10.3390/s21154968.

[42] “Microscopio digital de 4.3 pulgadas DM7-Z33: Manual de usuario V2.0”.

[43] Weller Tools, “ESF120 Antistatic PCB Board Holder”. [En línea]. Disponible en: https://www.weller-tools.com/us/en/industrial-soldering/products/soldering-accessories/esf120

[44] Tektronix, “What is a Digital Multimeter? Types, Uses & How to Choose”. [En línea]. Disponible en: https://www.tek.com/en/what-is-a-digital-multimeter

[45] Fluke Corporation, “4 Most Accurate Resistance Measurement Methods”. [En línea]. Disponible en: https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/calibration/resistance-measurement-methods

[46] Fluke Corporation, “How to Measure Resistance with a Digital Multimeter”. [En línea]. Disponible en: https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/digital-multimeters/how-to-measure-resistance

[47] Fluke Corporation, “A Guide to Continuity Testing with a Multimeter”. [En línea]. Disponible en: https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/digital-multimeters/how-to-test-for-continuity

[48] National Instruments, “Digital Multimeter (DMM) Measurement Fundamentals”, mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.ni.com/en/shop/electronic-test-instrumentation/digital-multimeters/dmm-measurement-fundamentals.html