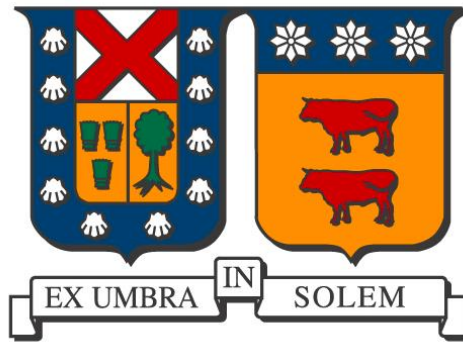


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

SANTIAGO - CHILE



“DISEÑO DE MAQUINA SOLDADORA CNC PARA
USO DOCENTE”

CHRISTOPHER ANDRES FUENTES OYANEDEL

MEMORIA DE TITULACION PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUIA: MARIO VILLA DURAN

PROFESOR CO-REFERENTE: LUIS GUZMAN BONET

FECHA:

Indice de Contenido

Agradecimientos	17
1.Introducción.....	18
2.Objetivos.....	20
2.1. Objetivo General.....	20
2.2. Objetivos Específicos	20
3.Estado del Arte.....	21
3.1. Procesos de adición de material.....	21
3.1.1. Fotopolimerización.....	21
3.1.2. Powder Bed Fusion.....	22
3.1.3. Sheet Lamination.....	23
3.1.4. Extrusión de Material	24
3.1.5. Material Jetting	25
3.1.6. Binder Jetin.....	26
3.1.7. Deposición con Energía Directa	27
3.2. Soldadura de precisión por deposición de gota.....	29
3.2.1. Deposición Continua	29
3.2.2. Deposición Discreta	30
3.3. Soldadura por alimentación por alambre de metal.....	31
3.3.1. Adición de alambre mediante laser	31
3.3.2. Adición de alambre de metal mediante haz de electrones	32
3.3.3. Adición de alambre de metal mediante arco eléctrico.....	33
3.3.4. Estrés residual y deformaciones.....	34
3.3.5. Precisión y calidad superficial.....	35
3.4. Placas de Circuito Impreso (PCB).....	37
3.4.1. Tipos de PCB.....	38
3.4.1.1. PCB de Lado Único.....	38
3.4.1.2. PCB de Lado Doble.....	38
3.4.1.3. PCB de Lados Múltiples.....	40
3.4.1.4. PCB Rígidas y Flexibles	40

3.4.2. Componentes Electrónicos en una PBC.....	40
3.4.2.1. Resistores	41
3.4.2.2. Potenciómetros	42
3.4.2.3. Termistores.....	43
3.4.2.4. Capacitores	44
3.4.2.5. Inductores.....	44
3.4.2.6. Diodos.....	45
3.4.2.7. Transistores	45
3.4.2.8. Tiristores	46
3.4.2.9. Circuitos Integrados.....	47
3.4.2.10. Microprocesadores (CPU)	48
3.4.2.11. Memorias Semiconductoras	49
3.4.2.11.1 .RAM	49
3.4.2.11.2. ROM	50
3.4.2.12. Microcontroladores	51
3.4.2.13. Dispositivos de montaje en superficie (SMD).....	51
3.4.2.14. Disipadores de calor.....	51
3.4.2.15. Transformadores.....	52
3.4.2.16. Relés.....	52
3.4.2.18. PCB Standards.....	53
3.4.3. Soldadura en PCB	54
3.4.3.1. Soldabilidad	55
3.4.3.2. Soldadura Blanda	55
3.4.3.3. Variables en el Proceso de Soldadura en PCBs	57
3.4.3.4. Materiales para Proceso de Soldadura en PCBs	57
3.4.3.4.1. Soldadura	58
3.4.3.4.2. Pastas y Fluidos (Flux)	59
3.4.3.4.3. Cabezal Soldador o Cautín.	61
3.4.3.5. Proceso de Ensamblaje de Componentes Electrónicos en PCB	64
3.4.3.5.1. Componentes THT.....	65
3.4.3.5.2. Componentes SMT	68
3.4.3.6. Limpieza Post Soldadura	69

3.4.3.6.1. Métodos de limpieza.....	69
3.4.3.7. Calidad y control de la unión por soldadura	70
3.4.3.7.1. Fallas comunes.....	71
3.4.3.7.2. Normas de calidad	75
3.4.3.7.3. Salud y seguridad	76
3.4.3.7.4. Re-manufacturación y reparación de PCBs	77
3.4.4. PCBs y medio ambiente en Chile	78
3.5. Tecnologías de Control Numérico	79
3.5.1. Componentes de un Sistema de Control Numérico	79
3.5.2. Sistema de coordenadas en CN	80
3.5.3. Control de movimiento en CN	80
3.5.3.1. Sistemas de control de movimiento según su trayectoria	81
3.5.3.2. Sistemas de control de movimiento según su posicionamiento	81
3.5.4. Análisis del sistema de posicionamiento en CN.....	82
3.5.4.1. Sistemas de Posicionamiento de Ciclo Abierto	83
3.5.5. Precisión en el posicionamiento del cabezal	84
3.5.5.1. Resolución de control	84
3.5.5.2. Exactitud	86
3.5.5.3. Capacidad de repetición (Repetibilidad)	86
3.5.5.4. Backlash	87
3.5.6. Programación de pieza por CN	87
3.5.6.1. Programación Manual de Pieza	88
3.5.6.2. Ingreso Manual de Datos (MDI)	88
3.5.6.3. Programación asistida por computadora.....	89
3.5.6.4. Programación asistida por CAD/CAM	89
3.5.7. Lenguaje de programación RS-274/NGC	90
3.5.7.1. Formato de línea.....	90
3.5.7.2. Numero de línea	91
3.5.7.3. Palabra.....	91
3.5.7.4. Número.....	92
3.5.7.5. Valor de parámetro	92
3.5.7.6. Expresión y operación binaria.....	92

3.5.7.7. Valor de operación unitario	93
3.5.7.8. Grupos Modales.....	94
3.5.7.9. Código G	95
3.5.7.10. Código M.....	97
3.5.8. Software e interfaz de control para maquinas CNC.....	98
3.5.9. Aplicaciones del control numérico	99
4. Diseño y selección de componentes para soldadora CNC.....	100
4.1. Configuración y características de la soldadora CNC	100
4.2. Selección de mecanismo alimentador de estaño	102
4.3. Selección de cabezal soldador	105
4.4. Selección fuente de poder.....	107
4.5. Selección de componentes estructurales.....	109
4.6. Descripción de componentes del sistema de posicionamiento.....	111
4.6.1. Carros de eje	111
4.6.1.1. Carro X	111
4.6.1.2. Carro Y	112
4.6.1.3. Carro Z	113
4.6.2. Eje motriz	114
4.6.3. Tuerca motriz	116
4.6.4. Guías lineales.....	118
4.6.5. Rodamiento y cojinete.....	119
4.6.6. Motor paso a paso.....	120
4.7. Diseño abrazadera para adaptación cabezal	121
4.8. Unidad de apoyo: Gabinete	123
4.9. Selección de hardware, firmware y software	123
4.9.1. Hardware	123
4.9.1.1. CNC Shield GRBL v3.0 Arduino UNO	124
4.9.1.2. Driver Papolu A4988	125
4.9.1.3. Tarjeta de estación S3100.....	127
4.9.1.4. Relé	128
4.9.2. Firmware	128
4.9.3. Software	129

4.10. Parámetros de soldadura	130
4.11. Benchmarking maquinas soldadoras CNC	131
4.12. Diseño 3D de soldadora CNC.....	134
4.12.1. Diseño estructura soporte.....	134
4.12.2. Diseño sistema posicionamiento.....	136
4.12.3. Diseño mecanismo de alimentación de alambre.....	138
4.13. Diagrama de cuerpo libre de maquina CNC.....	139
4.13.1. DLC eje X.....	139
4.13.2. DCL eje Y.....	143
4.13.3. DCL eje Z.....	144
1.2. Esquema eléctrico del circuito de maquina CNC	146
5.Ensamblaje de maquina CNC.....	148
5.1. Estructura y carro X	148
5.2. Estructura y carro Y	149
5.3. Estructura y carro Z	149
5.4. Sistema de alimentación de estaño	150
5.5. Sistema electrónico y eléctrico	152
5.6. Set up.....	153
6. Puesta en marcha y resultados.....	153
6.1. Deposición de material.....	155
6.2. Soldadura por punto de resistencias en PCB	157
6.3. Soldadura continua de láminas de cobre y aluminio.	159
7. Conclusiones	163
7.1. Tecnologías del proceso de soldadura por maquinas CNC	163
7.2. Componentes estructurales, mecánicos y electrónicos para la construcción de la CNC.	164
7.3. Diseño de maquina soldadora CNC y adaptación de componentes	165
7.4. Ensamblaje y construcción de maquina soldadora CNC.....	166
7.5. Proceso de soldadura utilizando maquina soldadora CNC	167
8. Mejoras y recomendaciones.....	168
9. Referencias.....	169

Índice de Figuras

Figura 1.	Esquema de proceso de tipo SLA.	22
Figura 2.	Esquema del proceso de PBF.	23
Figura 3.	Deposición y posterior arranque de material sobrante.	24
Figura 4.	Muestra esquema básico del mecanismo de extrusión del FDM.....	25
Figura 5.	Muestra la configuración común de los principales elementos de una impresora 3D..	26
Figura 6.	Esquema básico de una máquina de tecnología BJ.	27
Figura 7.	Distintos mecanismos para el suministro de material de aporte utilizado en DED.	28
Figura 8.	Esquema de la deposición continua de gotas.	30
Figura 9.	Esquema de deposición mediante gotas discretas.	31
Figura 10.	Muestra la variación y características físicas del fundido de material mediante la deposición por láser bajo los parámetros de velocidad de fundido y potencia entregada por el láser.	32
Figura 11.	Esquema básico del sistema de deposición por EBF.....	33
Figura 12.	Esquema de GMAW (a), GTAW (b) y PAW (c).	34
Figura 13.	Comparación del área efectiva de soldadura entre GTAW (derecha) y PAW (izquierda).	34
Figura 14.	Diferencias entre la deposición tradicional y la deposición selectiva.....	35
Figura 15.	Diferencias en el ajuste del espesor de capa: a) modelo sólido, b) capas constantes, c) ajuste de espesor.	36
Figura 16.	Escalonamiento de cordones adyacentes.	36
Figura 17.	Efecto escalera vertical entre capas de material.....	36
Figura 18.	Muestra el esquema básico de una PCB de lado único.	38
Figura 19.	Muestra esquema básico de las PCB non-PTH y PCB PTH.....	39
Figura 20.	Muestra esquema de la unión por PTH (a) y non-PTH (b).....	40
Figura 21.	Muestra esquema básico en corte de una PCB de lados múltiples.....	40
Figura 22.	Simbología de un resistor y sus variantes.	42
Figura 23.	Sistema de códigos utilizado para cuantificar el valor de la resistencia.....	42
Figura 24.	Simbología de un potenciómetro.....	43
Figura 25.	Variación la resistencia según ángulo.	43

Figura 26.	Muestra la simbología de un capacitor y sus variantes.	44
Figura 27.	Simbología de un inductor y sus variantes.	45
Figura 28.	Simbología de un diodo.....	45
Figura 29.	Concepto básico y simbología de un transistor.....	46
Figura 30.	Simbología de un tiristor.	46
Figura 31.	Representación básica de un IC con distintos pines.....	47
Figura 32.	Representación de los datos técnicos impresos en un IC.	48
Figura 33.	Simbología básica de una ROM de 1024-8 bit.....	51
Figura 34.	Muestra las terminales de unión más comunes en los SMD.....	51
Figura 35.	Esquema básico de un disipador a un elemento electrónico.....	52
Figura 36.	Simbología de un transformador con núcleo férnico.	52
Figura 37.	Simbología básica de un solenoide.	53
Figura 38.	Esquema representativo de la unión intermolecular del Cu y Sn.....	56
Figura 39.	Relación entre la resistencia a la tracción y espesor de la unión intermolecular.....	57
Figura 40.	Diagrama de fases de estado de la aleación estaño plomo.	58
Figura 41.	Límite de contaminantes permitidos y establecidos en la especificación QQ-S571 de la norma QQ-517d.	59
Figura 42.	Diagrama de la composición de un flux.	60
Figura 43.	Tabla de los flux dispuestos en la norma IPC-J-004.....	61
Figura 44.	Muestra los elementos básicos de un cautín manual (a), pistola soldadora (b) y estación de soldadura (c).	62
Figura 45.	Muestra distintas formas y tamaños de boquilla.	63
Figura 46.	Pasos recomendados para sujetar las terminales a la PCB.....	65
Figura 47.	Diagrama de flujo para el sistema de inserción automática y soldadura de componentes con terminales en PCB (traducir mapeo).	66
Figura 48.	Muestra los pasos descritos esquemáticamente del ensamblaje automático de componente THT.....	67
Figura 49.	Diagrama de flujo para el sistema de inserción y soldadura manual de componentes SMT en PCB (traducir mapeo).	68
Figura 50.	Representa la terminal de unión de un componente SMT y las dimensiones consideradas para el criterio de aceptación.	71
Figura 51.	Esquema de unión THT y dimensiones consideras para el criterio de aceptación.	72

Figura 52.	Conexión por puentes no deseadas en el proceso de soldadura.	73
Figura 53.	Relleno aceptable para una componente y PCB con THT.	74
Figura 54.	Muestra la manifestación típica del defecto por desgasificación.	75
Figura 55.	Sistema de coordenadas standard utilizados en el control numérico.....	80
Figura 56.	Representación del sistema de coordenadas según su posicionamiento absoluto (puntos (2,3) y (6,8) con origen (0,0)) e incremental (trayectorias {4} y {5}).	82
Figura 57.	Muestra el arreglo simple de un sistema de posicionamiento.....	82
Figura 58.	Muestra parte del rango del eje del sistema de posicionamiento con tres puntos de control, donde se observa la resolución de control, exactitud y repetibilidad.	87
Figura 59.	Muestra el efecto de desplazamiento o backlash que se produce entre la unión mecánica de la tuerca motriz A y el tornillo motriz B.....	87
Figura 60.	Muestra los operadores unitarios aceptados en el lenguaje RS-274/NGC.....	93
Figura 61.	Muestra los grupos modales de los comandos en el lenguaje RS-274/NGC.	94
Figura 62.	Muestra el interfaz del software Openbuilds CONTROL con un ejemplo de visualización de la trayectoria de la herramienta.....	99
Figura 63.	Muestra las características de la PCB a utilizar en la puesta en marcha de la maquina soldadora CNC.....	101
Figura 64.	Muestra el gabinete disponible para utilizarlo como unidad de soporte auxiliar.	102
Figura 65.	Muestra las características del material de aporte que será utilizado en el desarrollo de este proyecto.	103
Figura 66.	Mecanismo alimentador de material por ruedas dentadas	103
Figura 67.	Mecanismo comercial de ajuste mediante resorte para regular presión entre ruedas dentadas.	104
Figura 68.	Motor 12 [V].....	104
Figura 69.	Extrusor MK8 y sus características. Se compone de un mecanismo de alimentación de material de ruedas dentadas, cabezal fundidor y boquilla.....	105
Figura 70.	Cabezal soldador de la estación de trabajo de soldadura S3100 y que se utilizara en este proyecto.....	106
Figura 71.	Estación de trabajo y sus características que utilizara como cabezal soldador en la realización de este proyecto.	107
Figura 72.	Fuente de poder de la estación de soldadura S3100 utilizada para suministrar energía al cabezal, pedal, tarjeta controladora y motor 12 [V].	108
Figura 73.	Transformador Liteon pe1300 de 12 [V] utilizado en este proyecto.....	109

Figura 74.	Kit CNC 3018 Pro	109
Figura 75.	Carro X.	112
Figura 76.	Carro Y.....	113
Figura 77.	Carro Z.....	114
Figura 78.	Tornillo guía referencial que se utilizará en este proyecto	115
Figura 79.	Muestra características de una rosca ACME.	115
Figura 80.	Tuercas motrices de cada eje a) Eje X, b) Eje Y y c) Eje Z con sus respectivas tuercas antibacklash.	116
Figura 81.	Sistema anti-backlash de resorte dispuesto en cada eje.....	117
Figura 82.	Ejes guías lineales que se utilizaran para todos los ejes.....	118
Figura 83.	Rodamiento lineal de bolas.....	119
Figura 84.	Rodamiento radial de bolas 608zz.	120
Figura 85.	Motor paso a paso NEMA 17 42SHDC3025-24B.	120
Figura 86.	Acople rígido 5/8 [mm].	121
Figura 87.	Abrazadera para cabezal soldador.	122
Figura 88.	Mecanismo de apriete para cabezal soldador en el carro Z.....	122
Figura 89.	Gabinete adaptado con los elementos de la estación de trabajo S3100.	123
Figura 90.	Tarjeta controladora compuesta por el a) módulo de expansión CNC Shield v3.0 y b) microcontrolador Arduino UNO ATmega328P.....	124
Figura 91.	Esquema de componente, señales de entrada y salida de la placa Arduino Uno.	125
Figura 92.	Driver Papolu A4988.	126
Figura 93.	Esquema de señales de los pines del controlador A4988.	126
Figura 94.	Tarjeta controladora de la estacion de soldadura S3100.....	127
Figura 95.	Relé	128
Figura 96.	Interfaz del software OpenBuilds CONTROL.	129
Figura 97.	Ventana secundaria del software Openbuilds CONTROL.....	130
Figura 98.	Pasta para soldadura con estaño Inddeep.	131
Figura 99.	Soldadora CNC Dongguan Biaoganzhizao Equipment Co., Ltd. Modelo: BG-55441....	132
Figura 100.	Soldadora CNC Guangdong Xiaowei Intelligent Technology Co., Ltd. Modelo: XW-SS331R	133

Figura 101.	Soldadora CNC Shenzhen Juli Brothers Machinery Co., Ltd. Modelo: JL-H331R	133
Figura 102.	Estructura de soporte X correspondiente al carro X.	135
Figura 103.	Estructura de soporte Y correspondiente al carro Y.	136
Figura 104.	Estructura de soporte Z correspondiente al carro Z.	136
Figura 105.	Sistema de posicionamiento para eje X.	137
Figura 106.	Sistema de posicionamiento para eje Y.....	138
Figura 107.	Sistema de posicionamiento eje Z.....	138
Figura 108.	Gabinete adaptado con el sistema de alimentación de estaño.	139
Figura 109.	DCL del sistema de posicionamiento eje X.....	140
Figura 110.	DCL del sistema de posicionamiento eje Y.	143
Figura 111.	DCL del sistema de posicionamiento eje Z.	145
Figura 112.	Esquema eléctrico de maquina soldadora CNC.....	147
Figura 113.	Carro X con su sistema de posicionamiento sin el motor paso a paso.....	148
Figura 114.	Estructura de apoyo y carro X con su sistema de posicionamiento y motor paso a paso.	149
Figura 115.	Estructura de apoyo y carro Y con su sistema de posicionamiento y motor paso a paso.	149
Figura 116.	Estructura de apoyo y carro Z con su sistema de posicionamiento y motor paso a paso.	150
Figura 117.	Mecanismo de alimentación de estaño dispuesto sobre el gabinete.	150
Figura 118.	Abrazadera hecha manualmente utilizada para acoplar el cabezal soldador al carro Z....	151
Figura 119.	Tarjeta controladora, relé y motor de 12[V] dispuestos dentro del gabinete.....	152
Figura 120.	Estructura de apoyo y carro Z con su sistema de posicionamiento y motor paso a paso.	153
Figura 121.	Perillas de la tarjeta controladora S3100 numeradas de izquierda a derecha.	154
Figura 122.	División de niveles según el ángulo de giro del potenciómetro de la tarjeta controladora S3100.	154
Figura 123.	Muestra la división de intervalos realizada para el control de los parámetros de soldadura.	155
Figura 124.	Prueba general de deposición de material en la placa PCB.	156
Figura 125.	Puntos de soldaduras hechos con distintos parámetros de soldadura.	156

Figura 126.	Resultados de prueba de soldadura en resistencias separadas por 7,63 [mm].	157
Figura 127.	Resultados de prueba de soldadura en resistencias separadas por 5,08 [mm].	158
Figura 128.	Resultados de prueba de soldadura en resistencias separadas por 2,54 [mm].	158
Figura 129.	Colocación de la resistencia en la PCB sujeta con la esponja de polietileno.	158
Figura 130.	Zoom de los puntos de soldadura en las terminales de una resistencia en la PCB.	159
Figura 131.	Resultado del proceso de soldadura para la unión de dos láminas de cobre con estaño.	161
Figura 132.	Resultado del proceso de soldadura con el movimiento vaivén sobre láminas de cobre.	162
Figura 133.	Resultado de los cordones de soldadura obtenidos realizando movimientos de vaivén.	162
Figura 134.	Resultados más aceptables del proceso de soldadura realizando cordones con movimiento de vaivén.	163

Indice de Tablas

Tabla 1.	Clasificación de algunos ejemplos de componentes electrónicos básicos.	41
Tabla 2.	Muestra las palabras utilizadas en el lenguaje RS-274/NGC y sus definiciones utilizadas para el control de máquinas CNC.	92
Tabla 3.	Muestra en lista los principales códigos junto a su función o significado.	97
Tabla 4.	Muestra en lista los principales códigos junto a su función o significado.	98
Tabla 5.	Componentes dentro del kit CNC 3018 y sus características.	111
Tabla 6.	Costos de los componentes para la fabricación de la maquina soldadora CNC de este proyecto.	132
Tabla 7.	Comparación entre características de las maquinas CNC comerciales y la creada en este proyecto.	134
Tabla 8.	Parámetros involucrados en el cálculo del par torsional necesario por el motor paso a paso del eje X.	142
Tabla 9.	Parámetros involucrados en el cálculo del par torsional necesario por el motor paso a paso del eje Y.	144
Tabla 10.	Parámetros involucrados en el cálculo del par torsional necesario por el motor paso a paso del eje Z.	146
Tabla 11.	Configuración optima de los parámetros en la prueba de deposición de material.	157

Tabla 12. Configuración de los parámetros en los intentos de soldadura continua en la placa controladora S3100.	160
--	-----

GLOSARIO

ABS: Material llamado acrilonitrilo butadieno estireno, utilizado en impresión 3D.

AC: Del inglés Alternating Current.

ALU: Del inglés Arithmetic Logic Unit.

ANSI: Del inglés American National Standards Institute.

AOI: Del inglés Automated Optical Inspection.

APT: Del inglés Automatic Programing Tool.

BJ: Del inglés Binder Jetting.

CAD: Del inglés Computer Aided Desing.

CAM: Del inglés Computer Aided Manufacturing.

CMOS: Del inglés Complementary Metal-Oxide-Semiconductor.

CN: Control Numérico.

CNC: Control numérico computarizado, viene del inglés Computer Numerical Control.

CPU: Del inglés Central Processing Unit.

DC: Del inglés Direct Current.

DED: Del inglés Direct Energy Deposition.

DIC: Del inglés Digital Integrated Circuit.

DMD: Del inglés Digital Mirror Divices.

EBF: Del inglés Electron Beam Fusion.

EBM: Del inglés Electron Beam Melting.

EEPROM: Del inglés Electrical Erasable Programmable Ramdon Only Memory.

EIA: Del inglés Electronic Industries Association.

EPROM: Del inglés Erasable Programmable Ramdon Only Memory.

ESD: Del inglés Electrostatic Discharge Proof.

FDM: Del inglés Fused Deposition Modeling.

FEM: Fuerza Electromotriz.

GMAW: Del inglés Gas Metalic Arc Welding.

GRBL: Nombre de software para el control mediante CN.

GTAW: Del inglés Gas Tugsten Arc Weilding.

HDI: Del inglés High Density Interconnection.

IC: Del inglés Integrated Circuit.

IEC: Del inglés International Electrical Commission.

IEEE: Del inglés Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IPC: Del inglés Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits.

ISO: Del inglés International Standardization Organization.

LIC: Del inglés Linear Integrated Circuit.

LSI: Del inglés Large Scale Integration.

MA: Del inglés Material Jetting.

MCU: Del inglés Micro Control Unit.

MDI: Del inglés Manual Data Input.

MIT: Del inglés Massachusetts Institute of Technology .

MJ: Del inglés Material Jetting.

Molex: Tipo común de conector utilizado para alimentar componentes. El nombre proviene de Molex Connector Company, que fue pionera en los conectores eléctricos de dos piezas que se convirtieron en estándar en computadoras y otros productos electrónicos.

MOS: Del inglés Metal Oxide Semicondutor.

MOSFET: Del inglés Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.

MSI: Del inglés Medium Scale Integration.

NC: Del inglés Normally Closed.

NCMS: Del inglés National Center for Manufacturing Sciences.

NEMA: Del inglés National Electrical Manufactures Association.

NO: Del inglés Normally Open.

PAW: Del inglés Plasma Arc Welding.

PBF: Del inglés Powder Bed Fusion.

PCB: Del inglés Printed Circuit Board.

PLA: Material llamado ácido poliláctico, utilizado en impresión 3D.

Pre-preg: Material compuesto, hecho de fibras "pre-impregnadas" y una matriz de polímero parcialmente curada, como resina epoxi o fenólica, o incluso termoplástico mezclado con cauchos.

PROM: Del inglés Programmable Random Only Memory.

PTH: Del inglés Plated Through Holes.

PZT: Del inglés Lead Zirconate Titanate es un material piezoeléctrico.

WLAM: Del inglés Wire and Laser Additive Manufacturing.

RAM: Del inglés Random Access Memory.

ROM: Del inglés Random Only Memory.

SII: Del inglés Small Scale Integration.

SL: Del inglés Sheet Lamination.

SMD: Del inglés Surface Mount Device.

SMT: Del inglés Surface Mount Technology.

STL: Del inglés Stereolitografía.

THT: Del inglés Through Holes Technology.

VLSI: Del inglés Very Large Scale Integration.

WAAM: Del inglés Wire and Arc Additive Manufacturing.

Agradecimientos

Este trayecto ya transcurrido no sería nada sin las personas que me acompañaron en este duro pero lindo viaje. Durante mi estadía en la universidad pasé muchas alegrías, momentos de desmotivación y también de dudas en el desarrollo de este proyecto, especialmente dadas las condiciones en que se desarrolló todo. Sin embargo, allí estuvieron ustedes dándome ánimos y creyendo en mí.

A mis profesores aquí presentes también a través de este proyecto, siempre me ayudaron a visualizar cosas de otra manera, por sus enseñanzas, muchas gracias.

A mi familia que ha sido incondicional en el apoyo, paciencia y entrega que me brindaron todos estos años. Que sin ellos nada de esto hubiese sido posible. Eternamente agradecido con ustedes.

A mis amigos y amigas que conocí en la universidad, que hicieron mis días más gratos llenando de buenos recuerdo mi pasar por la universidad.

Gracias por haber estado cuando nadie más estuvo.

1. Introducción

El desarrollo de la tecnología computacional ha presentado un crecimiento acelerado en las últimas décadas y con ello su aplicación en distintos ámbitos, uno de ellos es la industria manufacturera. Su desarrollo ha abierto la posibilidad de realizar trabajos complejos y en cortos periodos de tiempo en comparación a su elaboración manual, con ello han surgido distintos procesos y métodos de dar forma a piezas y artefactos.

Durante la formación del Ingeniero Civil Mecánico en la Universidad Federico Santa María se desarrollan distintas habilidades y competencias que se abordan en distintos ramos de la carrera. Es en las asignaturas Taller I y Taller II donde se estudian y practican manualmente los principales procesos de manufactura como torneado, fresado y soldadura, en el cual tenemos una comunicación tangible con las máquinas logrando un aprendizaje e interiorización de los contenidos al llevar la teoría de máquinas y herramientas directo a la práctica. A este aprendizaje se le agrega valor al realizar distintas actividades como ir al laboratorio de la UTFSM Campus Valparaíso a ver el funcionamiento de un torno operado por una computadora de control numérico (CNC) o visitas a empresas dedicadas al rubro de la manufactura, donde se puede apreciar también, equipos y procesos automatizados CNC. Sin embargo, no es posible visualizar automatizada en su totalidad las maquinas vistas en el curso, faltando el proceso de soldadura.

Es por esto, por lo que me surge la necesidad de poder aportar con el acercamiento y entendimiento de estas tecnologías y al proceso de aprendizaje de mis futuros compañeros y colegas para así complementar aún más la formación del Ingeniero Civil Mecánico, dando cuenta de la amplia cantidad de herramientas que poseemos y de los grandes desafíos que se nos vienen en el futuro.

En el presente documento se presentará la construcción de una maquina soldadora CNC con la capacidad de soldar componentes electrónicos en una placa de circuito impreso (PCB) con aporte de material blando como el estaño y con movilidad en 3 ejes. La máquina se dispondrá si así lo desea la universidad, en el FabLab (Fabrication Laboratory) del Campus San Joaquín de nuestra universidad y a disposición de todos los alumnos de la Universidad Técnica Federico Santa María cuyos intereses o curiosidades deseen satisfacer con el uso de esta máquina.

El proceso de soldadura a diferencia de las maquinas convencionales CNC, para dar forma a una pieza final se realiza un proceso de adición de material en vez de removerlo como en la maquinas con portaherramientas. Es por esto por lo que se estudiará los procesos actuales de adición de material y las distintas tecnologías empleadas en ellos para dar forma a una pieza. También se les prestara atención a los distintos procesos de soldadura existentes y sus mecanismos de emplear el material de aporte. Por otro lado, se estudiará los efectos provocados por la soldadura en los materiales, como el estrés residual y deformaciones.

Las tecnologías de control numérico y su entendimiento son esenciales para automatizar la maquinas CNC, es por ello que se estudiará su lenguaje de programación y su funcionamiento.

También de los distintos software y plataformas computacionales para controlar, monitorear y ejecutar los movimientos necesarios para cumplir con el objetivo de este proyecto

La comprensión de las PCB y su desarrollo a través del tiempo indican que son un artefacto tecnológico que constantemente ha evolucionado y que presentan una gran importancia para todos los aparatos electrónicos que son de uso cotidiano. Es por esto que se presentara un estudio acerca de las PCB, sus componentes, orígenes, materiales y formas. Con especial atención en el proceso de soldadura en placas PCB.

Una vez teniendo los conocimientos necesarios para desarrollar el proyecto, se realizará una selección de componentes basados en la conveniencia económica, disposición de material y parámetros necesarios que se requieren por parte de la máquina para realizar el proceso de soldadura. Se seleccionarán, cabezal, componentes estructurales, placas controladoras, sistema de posicionamiento, fuente de poder, etc.

Finalmente se ensamblarán los componentes y se realizarán distintas pruebas de soldadura con el fin de poner a prueba las capacidades de la maquina soldadora CNC construida. Una vez teniendo los resultados de las pruebas se concluirá sobre el trabajo expuesto y se realizará una serie de recomendaciones para futuros proyectos que impliquen el uso o mejoramiento de la maquina soldadora CNC.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Este proyecto busca diseñar una máquina soldadora de control numérico computarizado (CNC), con las capacidades de moverse en 3 ejes y de soldar componentes electrónicos en placas de circuito impreso (PCB), a través de un proceso de soldadura blanda utilizando estaño como material de aporte. Previamente se llevará a cabo una investigación de las distintas tecnologías implicadas, para luego seguir con el dimensionamiento de la máquina y selección de componentes disponibles en el mercado para diseñar y fabricar un prototipo funcional de la máquina soldadora CNC. Finalmente probar el prototipo de la máquina soldadora CNC para verificar y validar su diseño.

2.2. Objetivos Específicos

- Investigar y estudiar las tecnologías de deposición de material y soldadura por máquinas CNC.
- Investigar y estudiar las tecnologías relacionadas a las PCB.
- Diseñar máquina soldadora CNC, crear plano general utilizando software AutoCAD y listado de componentes para la fabricación de prototipo.
- Seleccionar componentes estructurales, mecánicos y electrónicos disponibles en el mercado necesarios para la fabricación del prototipo de la máquina soldadora CNC.
- Ensamblar componentes estructurales, mecánicos y electrónicos del prototipo de la máquina soldadora CNC.
- Verificar y validar la funcionalidad del prototipo de la máquina soldadora CNC, al obtener al menos un componente electrónico soldado a una PCB utilizando estaño como material de aporte.

3. Estado del Arte

3.1. Procesos de adición de material

Las tecnologías de adición de material surgieron en Japón en 1981 usando la técnica de estereolitografía (STL), el cual consistía básicamente en curar polímeros usando resina con las cuales se formaban capas para ir sobreponiéndolas una tras otra para dar la forma a la pieza. Más adelante en 1986 Charles Hull funda “3D systems” creando las primeras impresoras 3D y el formato STL para describir la geometría de la pieza y ser ejecutada por computadoras.

Luego surgieron otro tipo de tecnologías como el modelado por deposición de material derretido o FDM (Fused Deposition Modeling) el cual posee el material de aporte en forma de alambre el cual es calentado hasta alcanzar cierta densidad para ser depositado y formar capas. Esta tecnología fue patentada en 1989 por S. Scott Crump, quien fundó Stratasys, Ltd la cual aún se encuentra operativa. Ya pasado los 90s aparecieron una serie de tecnologías similares como el Powder Bed Fusion (PBF), Sheet Lamination (SL), Material Jetting (MJ) y Binder -jetting (BJ) todas patentadas individualmente. La patente de este tipo de tecnologías tiene un gran impacto en el desarrollo de estas, ya que los permisos para utilizar dichas patentes son liberadas después de 20 años y es debido a esto por lo que en las últimas décadas se ha apreciado el aumento de un gran número de competidores en el mercado reduciéndose considerablemente el precio de dichas tecnologías.

3.1.1. Fotopolimerización

También conocido como Estereolitografía (STL) fue uno de los primeros procesos de adición de material tras desarrollarse los fotopolímeros, aplicándose a la industria automotriz, médica y aeroespacial.

Este proceso se compone de un recipiente que contiene el fotopolímero mezclado con la resina y por encima de esta se ubica una fuente de radiación que químicamente reacciona con la mezcla. El sistema de radiación utiliza dispositivos ópticos, por lo general luz UV en forma de láser, para apuntar sobre la superficie de la batea y curar la capa superior, solidificándola. También se utiliza para el curado rayos de electrones y rayos gamma, pero todo depende del fotopolímero que se desee trabajar y las propiedades finales que se desean.

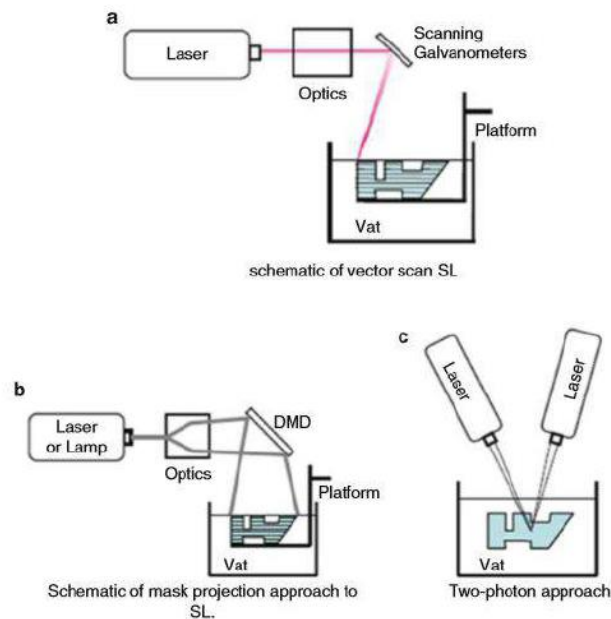


Figura 1. Esquema de proceso de tipo SLA.

Fuente: Gibson, I & Rosen, D. & Stucker B. (2015). *Additive manufacturing technologies*. (2nd edition, 1-2). Springer: New York, Heidelberg, Dordrecht ISBN 978-1-4939-2112-6

Para curar la resina con esta tecnología es posible realizarlo a través de un láser óptico focalizado en un pequeño punto que escanea la superficie que se desea variando el ángulo del espejo de la Figura 1.a, también se puede a través de micro espejos digitales o DMD (Digital Mirror Devices), el cual cuenta con una resolución de 1024x768 pixeles, siendo cada pixel un micro espejo que puede ser controlado independientemente como en la Figura 1.b, capaz de curar una superficie más amplia demorando mucho menos que el método anterior. Finalmente, para trabajos de mayor precisión se tiene el método de intersección de fotones como en la Figura 1.c, capaz de lograr una resolución de hasta de 1[μ m], a diferencia de los métodos anteriores, el curado de la resina no se realiza sobre la superficie, sino al interior de la batea al interceptarse dos haces de luz emitidos por láseres.

3.1.2. Powder Bed Fusion

Fusión en cama de polvo o PBF, es una de las tecnologías de deposición de material más antiguas junto con el STL.

A diferencia del método anterior el PBF usa pequeñas partículas de material en forma de polvo dispuestas en un recipiente las cuales son esparcidas y aplanadas por un rodillo o cuchillo. Para el curado del material que puede ser desde polímeros hasta ciertos metales, se utilizan haces de luz de electrones o EBM (Electron Beam Melting) que interactúan física y químicamente provocando el endurecimiento y unión de las partículas del material particulado. Luego de producirse el curado de la capa superficial que contiene el polvo, la

bandeja se desliza para que el rodillo vuelva a rellenar con las partículas de polvo para comenzar el curado de la siguiente capa.

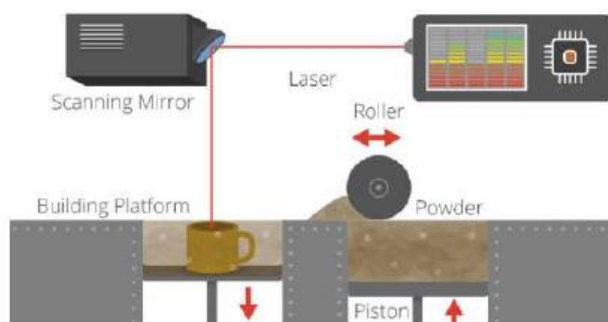


Figura 2. Esquema del proceso de PBF.

Fuente: Extraído de internet desde <https://www.3dprintinglab.com.hk/blog/using-powder-based-printing-material-sls-3d-printing>

El proceso de curado por EBM solo es compatible con materiales que tengan una alta conductividad eléctrica ya que debido a la electrostática si se polarizan partículas vecinas con la misma carga se repelerán y causara una ruptura en la capa y con ello una discontinuidad no deseada. A su vez hay materiales como el aluminio que presentan una alta reflectividad, lo que impide la absorción de la energía cinética de los electrones lo cual dificulta el curado.

3.1.3. Sheet Lamination

La laminación de hoja es una tecnología que utiliza delgadas capas de material para dar origen a una pieza, muy similar al proceso de STL, con la diferencia que su uso se ha orientado principalmente al trabajo con metales. Para lograr dar volumen a la pieza existen dos procedimientos en el cual se deposita la capa y luego es removido el exceso de material, y por otro lado en el cual la capa previamente es moldeada y cortada a la forma deseada para ser luego depositada sobre el sustrato.

Ambas opciones son válidas dependiendo del trabajo que se quiere realizar, debido a que cuando la capa es unida y luego cortada por un láser o cuchillo, el material que no se utilizará debe ser removido con el cuidado de no dañar las capas previas inferiores, por lo que generar cavidades interiores resulta difícil. Mientras que cuando es previamente formada la capa y luego es depositada, requiere un manejo de material más preciso por lo que este tipo de máquinas suele ser más costoso, pero en contraste con el primer método se pueden lograr formas más complejas y sin riesgo de dañar las capas inferiores ya depositadas.

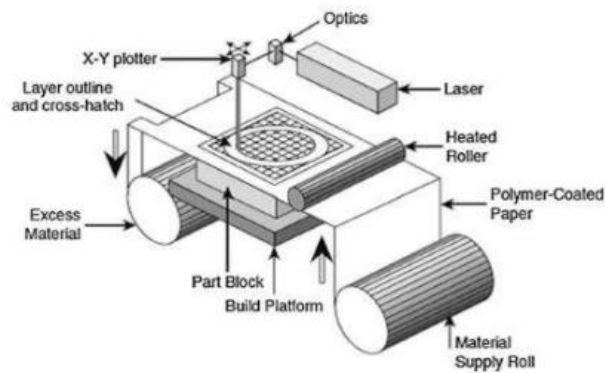


Figura 3. Deposición y posterior arranque de material sobrante.

Fuente: Gibson, I & Rosen, D. & Stucker B. (2015). Additive manufacturing technologies. (2nd edition, 200-201). Springer: New York, Heidelberg, Dordrecht ISBN 978-1-4939-2112-6

Para la unión de las capas de material existen métodos basados en la diferencia del punto de fusión del material estructural, cuyas capas están recubiertas con otro material con un punto de fusión más bajo, el cual funciona como adhesivo al momento de fundirse, generando la unión y cohesión entre las capas. Otro método utilizado para lograr la unión entre las capas consiste en ejercer presión perpendicularmente en 2 caras opuestas durante un largo periodo de tiempo usando algún tipo de pegamento o solo usando pegamento. Finalmente, cuando se necesita una cohesión certera entre las capas se utiliza ultrasonido para lograr difusión y fusión a una escala molecular. El curado y material de unión dependerá principalmente la naturaleza de los materiales con los cuales se trabaja y de las propiedades mecánicas finales que se requieren.

3.1.4. Extrusión de Material

También conocido como Fused Deposition Modeling (FDM) es una de las tecnologías de adición de material más populares debido a su bajo costo, gran masificación y diversidad.

Su principio de operación consta básicamente en que el material es derretido, extruido a través de una boquilla en forma de cono que es depositado sobre una plataforma fija o móvil. Este material se encuentra almacenado en la máquina en forma de hilo o alambre sólido envuelto en un carrete, el cual es empujado por dos ruedas, una lisa conducida y otra rugosa o dentada motriz, encargadas empujar y expulsar el material a través del calentador y de la boquilla cónica. La temperatura que alcanza el hilo de material sólido y la velocidad a la cual es extruido es crucial para lograr un buen acabado y que conserve sus propiedades mecánicas, ya que debe tener una consistencia líquida o parcialmente sólida para lograr una deposición suave sobre la superficie de la plataforma o capa anterior.

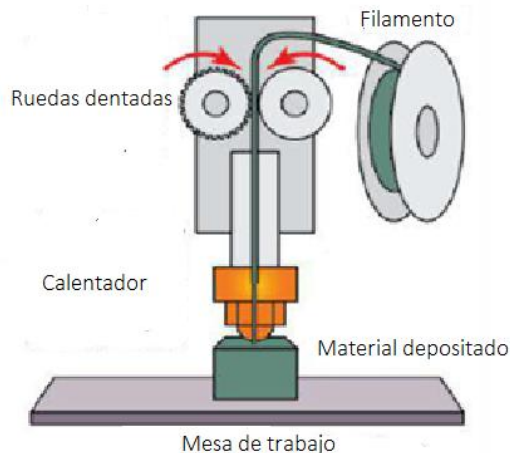


Figura 4. Muestra esquema básico del mecanismo de extrusión del FDM.

Fuente: Extraído de internet desde <https://www.machinedesign.com/markets/manufacturing-equipment/article/21834498/3d-printing-tips-and-tech-get-to-know-those-acronyms>

Cuando se trabaja en procesos de FDM es importante considerar también el tipo de material y como este reaccionará con el ambiente en el cual se está trabajando. Sin embargo, hay muchos materiales que pueden ser trabajados con esta tecnología, pero principalmente los polímeros como el ABS (Acrylonitrile Butadine Styrene), el PLA (Polylactid Acid), biodegradable y por ello muy utilizado actualmente, el Nylon y el PET (Polyethylene Tereohthalate) son los más ampliamente utilizados y han demostrado tener buen desempeño.

Una de las desventajas de este proceso es la precisión en comparación a las otras tecnologías ya descritas, puesto que no solo depende del diámetro de la boquilla, la cual oscila entre los 1,75 [mm] y 0,4 [mm] en modelos comunes llegando a espesores dentro de un rango de 0,05 [mm] a 0,3 [mm]. Si no también de la precisión de los motores paso a paso que le dan movilidad, combinando ambas variables pueden ser difícil de controlar al momento de querer diseñar una máquina.

3.1.5. Material Jetting

La tecnología de Material Jetting (MJ) fue principalmente influenciada por las impresoras 2D con la cual comparte ciertos principios básicos de operación, pero presenta una arquitectura diferente que le permite moverse en un espacio 3D.

La configuración que es utilizada para el funcionamiento de esta máquina consiste en la disposición de 2 materiales, uno estructural y otro de soporte opcional, los cuales son inyectados de manera continua o discreta a través de una boquilla o tobera en forma de diminutas gotas en estado líquido sobre la mesa de trabajo para solidificarse y formar la capa, luego opcionalmente es suavizada por una cuchilla de nivelación.

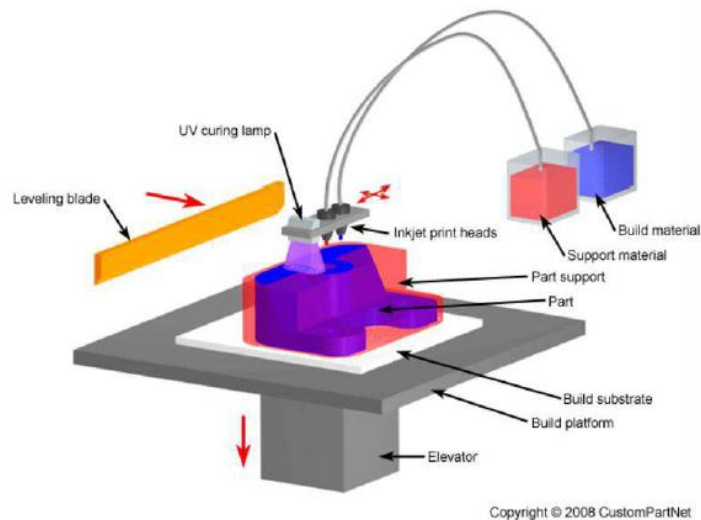


Figura 5. Muestra la configuración común de los principales elementos de una impresora 3D.

Fuente: Extraído de internet desde <http://www.custompartnet.com/wu/jetted-photopolymer>

Se debe tener en consideración que la gota de material al depositarse sobre el sustrato debe estar formada y debe fluir con facilidad a través de la boquilla. También otro tipo de parámetros a considerar son la distancia de vuelo que tiene la gota desde la boquilla al sustrato, el tamaño, la forma y la velocidad con la cual la gota impacta la superficie son parámetros que afectan la calidad de la pieza terminada. Una alta velocidad de impacto genera un esparcimiento del material indeseada, mientras que la forma y el tamaño afectan la disposición y precisión de unión de la gota respecto a la otra.

Los materiales utilizados por esta máquina deben ser lo suficientemente viscoso para fluir libremente por el sistema de inyección, esto con el fin de no requerir grandes presiones para ser extruido a través tobera, cuyos diámetros de salida se encuentran en un rango de entre los 0,1 [mm] a 0,001 [mm]. Es por esto que los fotopolímeros son ampliamente utilizados ya que tienen un punto de fusión relativamente bajo en comparación a otros materiales, lo que facilita también su solidificación y posteriormente su curado mediante luz UV. También se ha ampliado al uso de metales y materiales cerámicos, pero son menos utilizados debido a que los metales deben ser fundidos a altas temperaturas, lo que daña las boquillas y los dispositivos cercanos, mientras que la pieza hecha de material cerámico posterior a su formación debe someterse a un tratamiento térmico de alta temperatura para realizar el curado y alcanzar las propiedades mecánicas deseadas.

3.1.6. Binder Jeting

Usando en combinación las tecnologías de PBF y MJ en los 90's se desarrolló en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) la tecnología de inyección de aglomerante.

Su operación consta de una cama idéntica a la del proceso de PBF el cual cuenta con un rodillo que esparce las partículas de polvo sobre la superficie de trabajo. Una vez dispuesta la capa de material sobre la cama los inyectores se encargan de dar forma a la capa usando material aglutinante, proporcionando unión entre las partículas de polvo. Luego la cama se desplaza verticalmente la misma distancia que el espesor deseado, para finalmente pase el rodillo dejando lista la cama de trabajo para la siguiente capa. Unas de las ventajas de este proceso por sobre el de PBF es que no existe daños por temperaturas ni en la pieza ni en el material descartado, pudiéndose utilizar nuevamente.

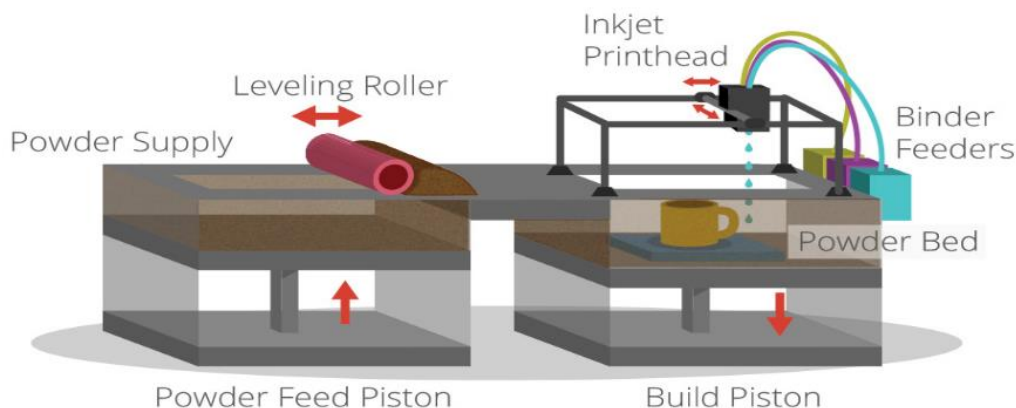


Figura 6. Esquema básico de una máquina de tecnología BJ.

Fuente: Extraído de internet desde <https://www.threeding.com/blog/%E2%80%8Bbinder-jetting-3d-printing-technology>

Los materiales utilizados por esta tecnología pueden ser polímeros, metales y arena, incluso otros materiales se han utilizado como yeso y cerámica, pero su uso se ha limitado solo a investigaciones. Uno de los principales campos de aplicación es la industria de fundiciones, las cuales utilizan esta tecnología para crear moldes de arena que le proporcionen una alta calidad superficial y formas complejas.

3.1.7. Deposición con Energía Directa

Conocida también como DED (Direct Energy Deposition) se caracteriza por su fuente de energía que focaliza la energía en una pequeña área para crear una diminuta piscina de material fundido y al desplazarse generar un cordón de material para formar la capa. Para evitar que el material ya depositado sufra daños debido a las altas temperaturas es necesario utilizar una cámara sellada de vacío o un gas inerte de protección.

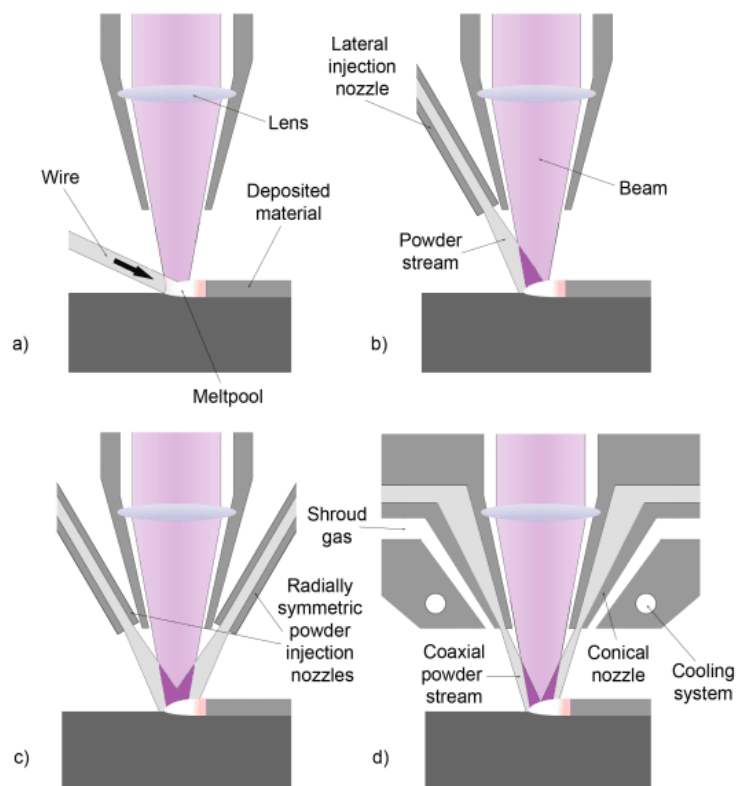


Figura 7. Distintos mecanismos para el suministro de material de aporte utilizado en DED.

Fuente: Extraído de internet desde

<https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/14946/The-Best-3D-Printer-Materials-Metals-Edition.aspx>

El material de aporte utilizado en esta tecnología es suministrado en forma de polvo o alambre, el cual es fundido por un haz de electrones o laser. La desventaja de utilizar la deposición mediante partículas de polvo como alguno de los métodos de la Figura 7b, 7c, 7d es que la fuente de energía no afecta homogéneamente a todas las partículas, lo que provoca inconsistencia en el fundido del material. A su vez el suministro mediante hilo es utilizado para geometrías simples debido a que su deposición tiene menos precisión.

La gran mayoría de los materiales pueden ser utilizados en esta tecnología, sin embargo, debido a las propiedades térmicas de los materiales cerámicos es que no son usados, ya que se requiere demasiada energía para ser fundidos. Por otro lado, son ampliamente utilizados los metales en forma de polvo o cable debido a su alta conductividad térmica, se pueden mencionar el acero al carbono, acero inoxidable, titanio, Inconel (aleación de níquel-cromo) y otro tipo de aleaciones.

3.2. Soldadura por deposición de gota de metal

La soldadura por medio de tecnologías de adición de material ha surgido debido a su amplia aplicación en la industria microelectrónica como en la conexión de circuitos y líneas finas de interconexión dentro de los aparatos electrónicos. El avance hacia dispositivos cada vez más pequeños y complejos ha generado un desplazamiento del trabajo manual y con ello una amplia demanda de este tipo de máquinas. Su habilidad para depositar material de manera rápida, controlada y precisa hace que este tipo de herramienta sea la preferida para el desarrollo de circuitos integrados (ICP) y placas de circuito impreso (PCB).

Los primeros indicios del fenómeno de formar una gota para luego ser emplazada sobre una superficie a través de un agujero datan del año 1833 por Savart y modelada matemáticamente por Lord Rayleigh en 1878. Hasta la fecha se han desarrollado muchas tecnologías de deposición, sin embargo, para una correcta deposición de una gota de material se abordan principalmente dos métodos: deposición continua de gotas y deposición discreta de gotas.

3.2.1. Deposición Continua

Una continua, rápida y constante ráfaga de pequeñas gotas son generadas aplicando una presión controlada al fluido a través de un material piezoeléctrico ubicado dentro de un reservorio de material líquido, el cual a su vez es excitado por vibraciones mecánicas de entre 5000 a 44000 [Hz], generando una perturbación sinusoidal para otorgarle mayor estabilidad al flujo de gotas. Esta vibración alcanza frecuencias muy cercanas a la vibración natural de la formación de la gota induciendo el fenómeno de tensión superficial. Para dar forma a la capa de material las gotas deben cumplir cierta posición y distancia respecto a la otra para unirse, esto se logra cargando eléctricamente la gota previamente antes de salir de la boquilla, para luego después pasar por una sección donde se encuentra unas placas deflectoras las que generan un campo eléctrico capaz de controlar la trayectoria de la gota antes de depositarse sobre el sustrato, la cantidad de carga aplicada a cada gota determina que tan lejos es desviada al pasar por el campo eléctrico dentro de las placas deflectoras. Si la gota es requerida esta pasa directamente por el deflector hacia la superficie, en cambio si no se requiere material esta es desviada a un depósito de descarte de material donde es acumulado y reusado. La combinación de un flujo controlado por la deflexión de pequeñas gotas y una deposición sobre el sustrato en la mesa de trabajo generan un rápido y preciso sistema de deposición de material llamado “impresión en vuelo”.

Algunas desventajas de este método recaen principalmente en la dificultad de controlar los parámetros en tiempo real de la carga de las partículas del material y del campo eléctrico en el deflector.

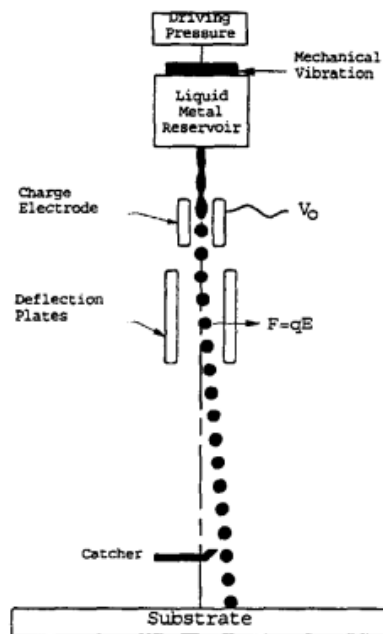


Figura 8. Esquema de la deposición continua de gotas.

Fuente: Q. Liu et Al., (2001), High Precision Solder Droplet Printing Technology: Principe and Application, Proceedings on the International Symposium on Advanced Packaging Materials: Processes, Properties and Interfaces, Missouri S&T: Missouri, EEUU.

3.2.2. Deposición Discreta

También llamada Droplet on Demand (DOD), es un método de deposición de material que se genera por un pulso de presión generado por un cambio de volumen dentro de la reserva de material líquido, lo cual produce una pequeña gota discreta solo cuando es requerida para su deposición. Esta presión es producida por un actuador térmico o piezoeléctrico, localizado dentro de la reserva de material. El actuador térmico se acciona al calentarse, a través de una resistencia un pistón en cuyo interior tiene gas Nitrógeno (N_2), el cual al llegar hasta cierta temperatura activa el pistón generando la presión para que la gota salga. Por otro lado, un transductor anular piezoeléctrico (PZT) es usado para generar el pulso de presión dentro del tubo capilar encargado de conducir el material, así el actuador piezoeléctrico a través de pulsos eléctricos es deformado lo que genera la presión para expulsar la gota de material. Este método permite velocidad de desplazamiento más moderadas en comparación a la deposición continua de gotas.

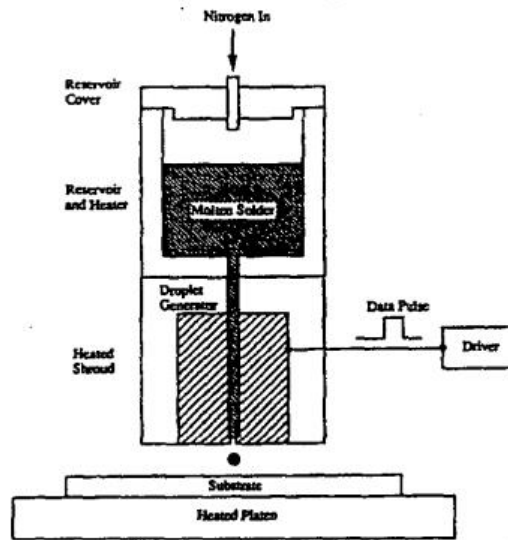


Figura 9. Esquema de deposición mediante gotas discretas.

Fuente: Q. Liu et Al., (2001), High precision solder droplet printing technology: Principe and Application, Proceedings on the International Symposium on Advanced Packaging Materials: Processes, Properties and Interfaces, Missouri S&T: Missouri, EEUU.

3.3. Soldadura por alimentación de alambre de metal

El uso de alambres en forma de rollos o carretes de metal como material de aporte para las tecnologías de adición de material proporciona una eficiencia de uso del 100%, ya que todo el material del alambre es depositado en el sustrato o componente fabricado. Además, durante todo el proceso no expone al operador de la maquina a un ambiente dañino en cuanto a material particulado que puede ser inhalado durante la operación, como lo es el caso del proceso de PBF al trabajar con polvos de material.

Al trabajar con alambre de metal es importante tener en consideración parámetros como la amplitud de deposición, espesor de la capa, diámetro del alambre, velocidad de deposición y material de soldadura para poder lograr las dimensiones y la calidad superficial deseada. Un control y manejo adecuado evita la aparición de esfuerzos residuales y distorsiones dentro del material causados por una aplicación excesiva de calor o una baja calidad superficial debido a la poca precisión y el efecto "stair stepping" o escalonado.

3.3.1. Adición de alambre mediante laser

También conocido como WLAM (Wire and Laser Additive Manufacturing) básicamente es un proceso donde es utilizado un láser y un sistema automatizado de alimentación para producir y llevar a cabo la fusión y deposición del material, como se muestra en la figura 10 el láser genera una piscina de material fundido sobre el sustrato formando la unión. Este es

un proceso flexible capaz de adaptarse a distintos tipos de metales y aleaciones como aleaciones de Hierro, Titanio y Aluminio.

La velocidad de deposición bajo este método esta principalmente relacionada a la energía dispuesta en el láser, lo cual implica que para lograr una correcta deposición se debe poner énfasis en el control de la velocidad de adición del alambre y la velocidad de soldadura. En la figura 10 se puede apreciar cómo afectan estos parámetros en el ancho, altura y fusión del alambre de metal (Ti-6Al-4V). Por lo general los trabajos realizados mediante láser, no presentan grietas ni porosidades.

Power (W)	WF (m/min)	50 mm/min	100 mm/min	150 mm/min	200 mm/min	250 mm/min
2600	2	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]
1650	2	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]
1200	1	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]

Figura 10. Muestra la variación y características físicas del fundido de material mediante la deposición por láser bajo los parámetros de velocidad de fundido y potencia entregada por el láser.

Fuente: Doughoung D., Z. Pan, D. Cuiuri, Li H. (2015), Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer-Verlad: London

3.3.2. Adición de alambre de metal mediante haz de electrones

La fusión mediante haz de electrones o Electro Beam Fusion (EBF) es una tecnología patentada por la NASA para diseñar y fabricar elementos complejos y con bajo uso de material al crear redes internas de material en vez de un relleno completo de la pieza. Aquí el alambre es introducido directamente a la piscina de material que es producida y mantenida por la energía aportada por el haz de electrones dentro de un ambiente de vacío para evitar la oxidación del material, es posible trabajar cualquier material que tenga conductividad eléctrica incluyendo a aquellos con alta reflectividad como el aluminio y el cobre. En este proceso la deposición de material está limitada principalmente solo por la precisión de posicionamiento y la velocidad de aporte del alambre, para lograr detalles y trabajos más precisos se requiere un diámetro menor de alambre ya que esto determina las características físicas como altura y ancho del cordón de material.

32

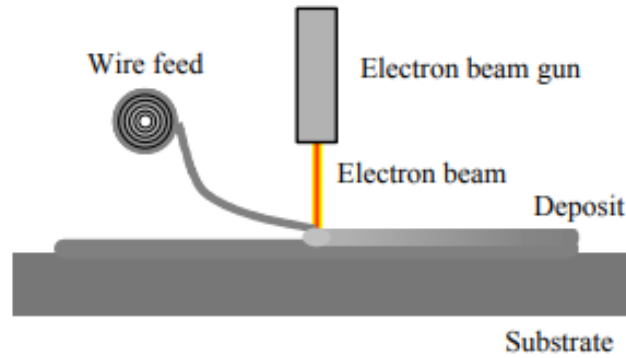


Figura 11. Esquema básico del sistema de deposición por EBF.

Fuente: Karen M. B. Tamiger and Robert A. Hafley (2003). *Electron Beam Deposition*. En: *Electron beam freeform fabrication: A rapid metal deposition process*. (3rd Annual Composites Conference,). Hampton, VA: Nasa Langley Research Center.

3.3.3. Adición de alambre de metal mediante arco eléctrico

También conocido como WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) distingue 3 procesos similares diferenciados en su fuente de calor, los cuales son: Soldadura por arco metálico de gas (GMAW)(a), soldadura por arco de gas tungsteno (GTAW)(b) y soldadura por arco de plasma (PAW)(c).

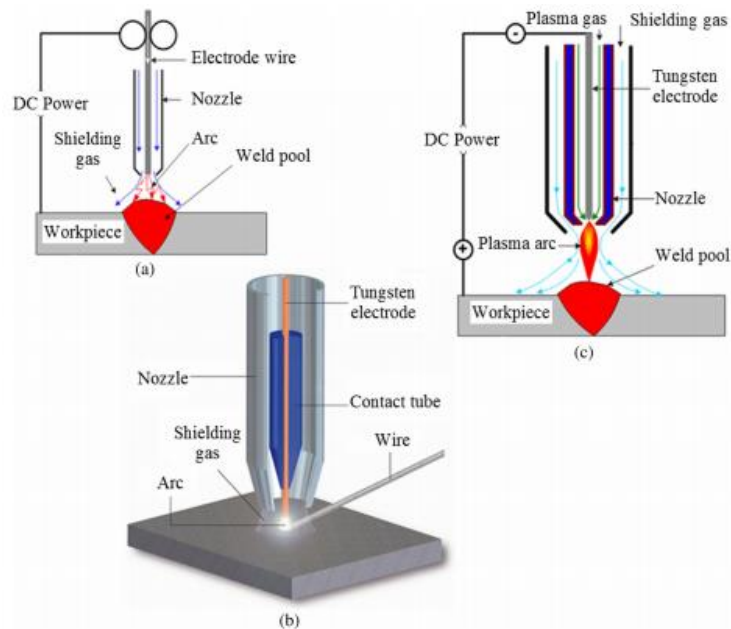


Figura 12. Esquema de GMAW (a), GTAW (b) y PAW (c).

Fuente: Doughoung D., Z. Pan, D. Cuiuri, Li H. (2015), Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer: London.

El proceso de GMAW se caracteriza por formar un arco eléctrico entre el alambre de metal y la pieza de trabajo, donde el alambre por lo general se suministra perpendicularmente a la pieza de trabajo y es consumido. Mientras que los procesos de GTAW y PAW utilizan un electrodo no consumible el cual produce la fusión del material, a su vez la orientación con la cual es suministrado el alambre es variable para cada trabajo y afecta principalmente la calidad superficial de la deposición. La diferencia entre estos dos últimos métodos radica en las altas temperaturas que se alcanzan sobre el área de soldadura, pudiendo el PAW alcanzar temperaturas 3 veces más altas que en el GTAW, lo que causa mayor estrés y distorsión en el grano del cordón de material.

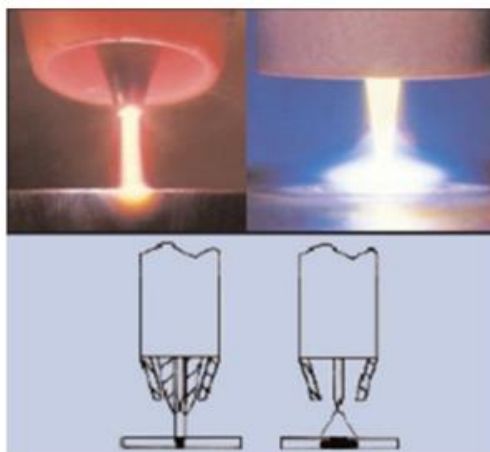


Figura 13. Comparación del área efectiva de soldadura entre GTAW (derecha) y PAW (izquierda).

Fuente: Doughoung D., Z. Pan, D. Cuiuri, Li H. (2015), Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer: London

3.3.4. Estrés residual y deformaciones

El control de estrés residual y deformaciones son la principal preocupación de los trabajos realizados por WAAM, lo cual no solo tiene efecto sobre las tolerancias de la pieza, sino que también sobre la falla prematura del cordón de material. Debido al cambio de temperatura experimentado por el material, es que este sufre deformaciones de expansión y contracción que no suelen ser uniformes, induciendo esfuerzos no deseados dentro del material. Para reducir el estrés residual en las piezas es conveniente definir y alternar patrones de deposición o áreas de deposición (figura 14) para generar pasajes de

enfriamiento, lo cual reduce considerablemente el sobre calentamiento del material. También es recomendable realizar y mantener un precalentamiento del sustrato para evitar que el material se exponga a cambios grandes de temperatura.

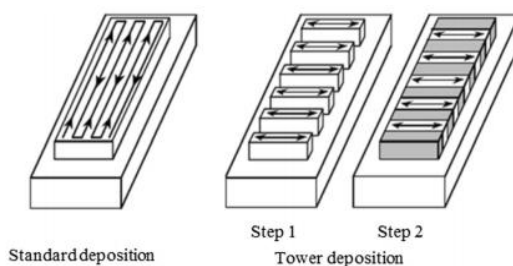


Figura 14. Diferencias entre la deposición tradicional y la deposición selectiva

Fuente: Fessler J.R., R. Merz, A.H. Nickel & F.B. Prinz, (1996), Laser deposition of metal for shape deposition manufacturing: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Carnegie Mellon University: Pennsylvania.

Una continua y prolongada deposición sobre una determinada área puede llevar a un calentamiento excesivo y con ello producir el fundido o cambios de temperatura indeseados en el material ya depositado, lo que causa baja precisión en cumplir tolerancias y calidad superficial.

3.3.5. Precisión y calidad superficial

Normalmente la construcción de una pieza por deposición de material se realiza mediante capas de material que cumplen con cierto espesor, una mala deposición de las capas puede llevar a uniones no uniformes entre partes de la misma pieza y provocar un efecto de escalonamiento. El espesor de la capa debe ser ajustada y configurada dependiendo de la geometría de la pieza, ya que la deposición, al efectuarse con capas con un espesor constante (figura 15.b), se pueden producir inconsistencias en la unión cuando el espesor de capa definido no encaja con las dimensiones del modelo solido (figura 15.a), sin embargo, con una estrategia adaptativa es posible ajustar automáticamente el espesor para que coincida con la forma de la pieza solida (figura 15.c).

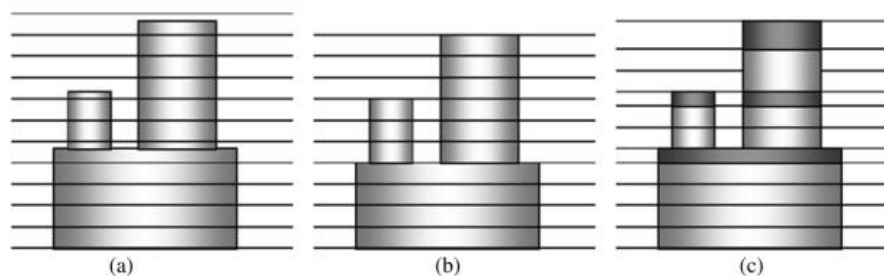


Figura 15. Diferencias en el ajuste del espesor de capa: a) modelo sólido, b) capas constantes, c) ajuste de espesor.

Fuente: Doughoung D., Z. Pan, D. Cuiuri, Li H. (2015), Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer: London

El efecto escalera o escalonado es otro elemento relacionado con la calidad superficial de la pieza, este efecto es generado por la superposición de capas y el espesor de la capa que forma un salto o discontinuidad en los bordes de material (figura 17), entre mayor sea el espesor de la capa mayor será el escalonamiento, por lo que cuando se requiere alta precisión en las tolerancias de la pieza, será necesario mecanizar la pieza. También este efecto se ve en cada capa de material, pero de manera adyacente como en la figura 16, entre cordones de material debido al ancho del cordón (w) y a la distancia que existe entre los centros de los cordones (d), cuyas imperfecciones se acumulan capa tras capa perjudicando la calidad superficial final.

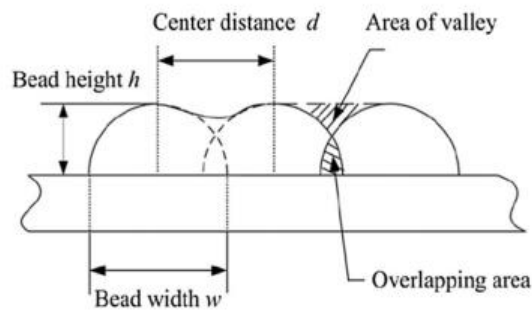


Figura 16. Escalonamiento de cordones adyacentes.

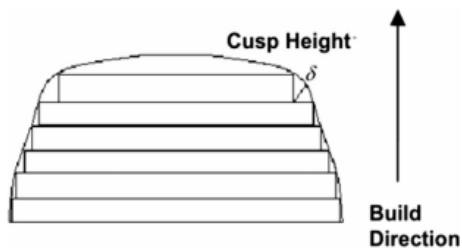


Figura 17. Efecto escalera vertical entre capas de material.

Fuente: Doughoung D., Z. Pan, D. Cuiuri, Li H. (2015), Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer: London

3.4. Placas de Circuito Impreso (PCB)

Todos los aparatos electrónicos de uso cotidiano son una combinación de elementos eléctricos y electrónicos que se unen para desempeñar una función específica. En un principio estos elementos electrónicos se encontraban individualmente unidos por cables que eran manualmente soldados punto por punto, dando origen a sistemas interconectados de gran tamaño, abultados, pesados y difíciles de comprender. La necesidad en distintas áreas como la aeronáutica, médica y militar requerían de artefactos cada vez más pequeños y livianos, esto incentivó el desarrollo hacia lo que hoy se conocen como placas de circuito impreso.

Las PCB comenzaron a ser comercializadas a principios de los años 50's, sin embargo, su concepto fue concebido mucho antes por Frank Sprague, fundador de Sprague Electric, quien en 1904 le propuso a su mentor Thomas Edison la idea de eliminar la unión por cables punto a punto, sugiriendo utilizar los métodos de reducción de plata en la fabricación de espejos para aplicarlo en placas, desde entonces se dio comienzo hacia el desarrollo de las PCB.

La primera contribución significativa hacia el desarrollo de las PCB fue hecha por Charles Ducas, quien en EE. UU. patentó el 2 de marzo de 1925 la propuesta de montar depósitos metálicos electrónicos en forma de conductores directamente sobre una superficie aislante para simplificar la construcción de artefactos electrónicos. El método descrito por Ducas consistía en utilizar un estencil para marcar las líneas conductoras sobre una placa aislante, posteriormente las líneas eran reforzadas manualmente por deposición de metal electrolítico, lo que simplificó la manufactura de aparatos electrónicos. Sin embargo, la contribución más importante fue hecha por el Dr. Paul Easler, quien propuso usar una lámina aislante recubierta con cobre, la cual era posteriormente marcada con el trazado de circuito deseado y finalmente el cobre sobrante era removido mediante una reacción química (etching). Easler también propuso el uso de ambos lados de la lámina mediante orificios que conectaran ambas caras de la lámina, esto junto con el método de fabricación dio paso para la producción en masa y una reducción significativa en tamaño y peso de los aparatos electrónicos.

El desarrollo de la tecnología durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945) para combatir los ataques enemigos aceleró la utilización de las PCB para la creación de nuevas armas letales, sin embargo, posterior a la guerra surgió una gran demanda por aparatos electrónicos como los televisores y radios, lo que demandó también una mayor complejidad, fiabilidad y nuevas formas de producción. Durante los años 1953-1955 Motorola también hizo aportes a la evolución de las PCB introduciendo el proceso de enchapado metálico de cobre (*"copper metal plating process"*), la cual facilita la conexión entre las caras de una tarjeta dando un salto hacia la producción en masa de las PCB.

A finales de los años 70s las PCB ya estaban consolidadas en la industria aeroespacial, médica, militar y doméstica, siendo utilizadas en la fabricación de cada uno de los aparatos electrónicos que se utilizaban comúnmente en el hogar. Además, junto con el desarrollo de las nuevas tecnologías y procesos de adición de material que se desarrollaron en el mismo periodo,

revolucionaron la manufactura y usos de las PCB dominando hasta el día de hoy el mercado, siendo un icono de la industria electrónica.

3.4.1. Tipos de PCB

Las PCB se componen esencialmente de una base y conductores. La base compuesta de un material con propiedades dieléctricas es utilizada para proveer de estructura y soporte para los conductores quienes se encargan de interconectar eléctricamente el circuito y también de otorgar consistencia y solides a los distintos puntos donde los elementos electrónicos se encuentran unidos a las PCB. Estas pueden ser clasificadas según sus atributos, tradicionalmente se clasificaban según su calidad para consumidores, profesionales y placas de alta confiabilidad, sin embargo, en la actualidad debido al avance en estas tecnologías, la diferencia entre las calidades de los productos es cada vez menor y es por esto por lo que comúnmente ahora se clasifiquen según la cantidad de planos o caras disponible para ser utilizadas.

3.4.1.1. PCB de Lado Único

Como su nombre lo dice las PCB de un solo lado son aquellas en las cuales se dispone de un lado único de la placa que cuenta con el trazado del circuito electrónico para ser utilizado (cara de soldadura), mientras que en la otra cara se emplazan los distintos componentes electrónicos (cara de componentes). Este tipo de placas son comúnmente usadas en los procesos de manufactura donde se busca una reducción de costos, sin embargo, representan un gran volumen dentro del mercado. Son comúnmente elaboradas por impresión y bañado químico o por fotograbado.

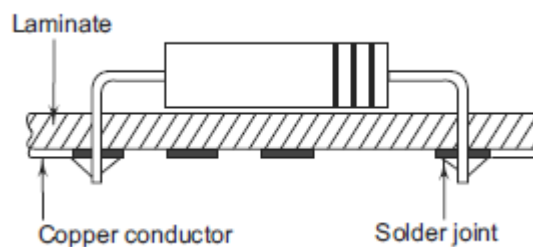


Figura 18. Muestra el esquema básico de una PCB de lado único.

3.4.1.2. PCB de Lado Doble

Este tipo de placa presenta patrones conductores en ambas caras de la superficie aislante siendo ambas utilizables, presentando mayor densidad de elementos electrónicos. Este tipo de placas se subdivide en 2 grupos según como ambos circuitos en las caras son conectados entre sí, se encuentran las PCB de lado doble a través de agujeros chapados (PTH) y las PCB de lado doble sin conexiones por agujeros chapados (non-PTH).

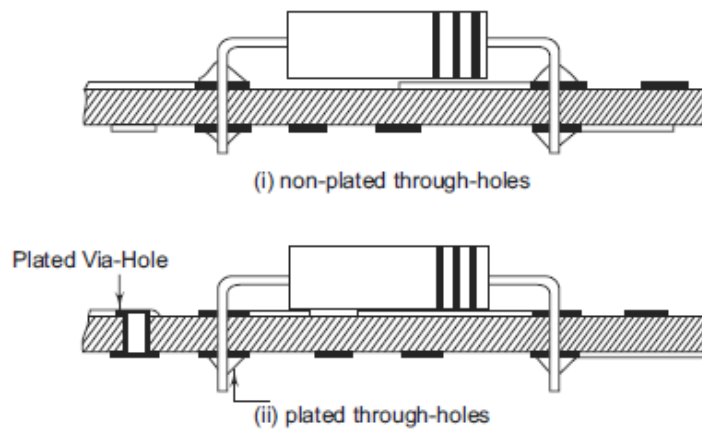


Figura 19. Muestra esquema básico de las PCB non-PTH y PCB PTH.

Las PCB PTH se caracteriza por tener ambas caras con circuitos impresos y además dichas caras se encuentran unidas conductivamente por agujeros cuya superficie interna cilíndrica se encuentra recubierta con el material conductor del circuito. Por otro lado, las PCB non-PTH son una extensión de las PCB de lado único ya que la conexión entre ambas caras solo se hace en lugares específicos donde es requerido, a través un elemento conector conductor que es soldado a ambas caras del circuito.

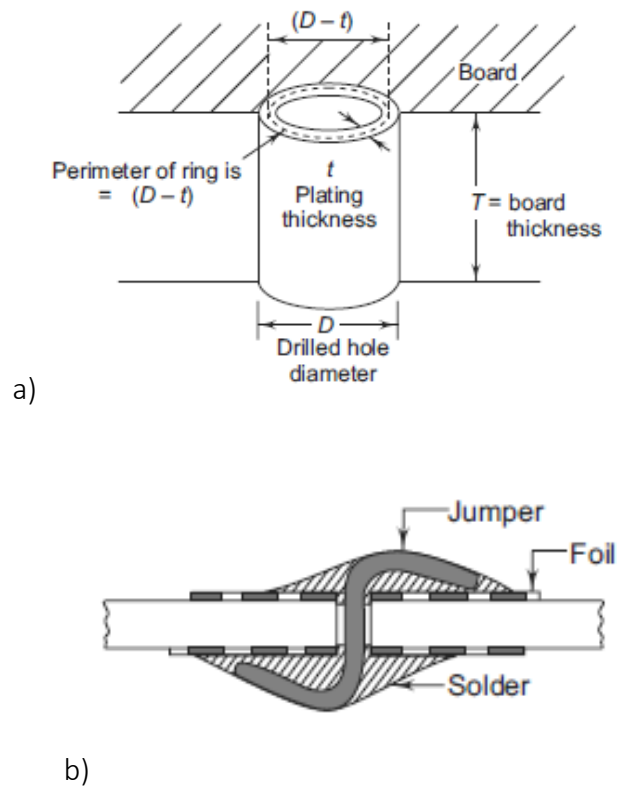


Figura 20. Muestra esquema de la unión por PTH (a) y non-PTH (b).

3.4.1.3. PCB de Lados Múltiples

La tecnología de conexión a través de agujeros ocupando en la placa ambos lados junto con los nuevos VLSI (very large-scale integration) incentivó el desarrollo hacia las PCB de múltiples capas lo cual redujo significativamente el espacio y aumento en la densidad de los elementos electrónicos ocupados en las PCB.

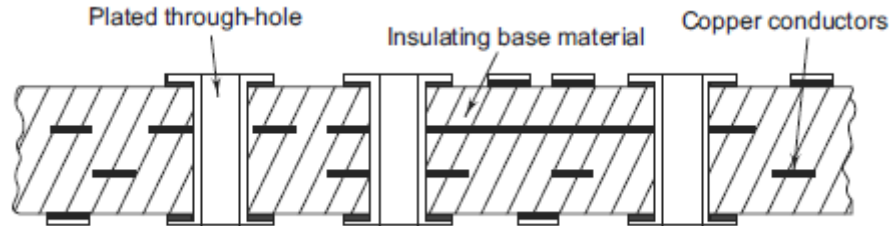


Figura 21. Muestra esquema básico en corte de una PCB de lados múltiples.

La placa de lados múltiples consiste en una placa de doble lado, la cual en su interior cuenta con un material base aislante “pre-preg” entre las caras extremas de la placa, cuyos circuitos que se encuentran al interior son interconectados entre sí a través de la tecnología PTH. Son muy similar a las PCB tradicionales y su uso se ha masificado ya que los costos de producir este tipo de PCB no son muy distintos a la producción de las otras ya descritas, caracterizándose principalmente por la alta densidad de elementos electrónicos que son conectados a las terminales.

3.4.1.4. PCB Rígidas y Flexibles

Las PCB también pueden ser clasificadas según la composición de su material aislante ocupado como base, según esto se distinguen entre rígidas y flexibles. Por lo general la base aislante de las PCB rígidas están hechas de fibra de vidrio, teflón o materiales cerámicos. El más común es el FR-4, el cual es una combinación de fibra de vidrio con material epóxico laminado que otorga características estructurales, aislantes y anti inflamables. Por otro lado, las PBC flexibles están hechas con materiales como poliéster o poliamida. En ambas clasificaciones se encuentran PBCs de un lado, de ambos y de multicapas.

3.4.2. Componentes Electrónicos en una PBC

Un componente electrónico se define como todo elemento dentro del circuito de la PCB capaz de transmitir y manejar electricidad. Hasta la fecha se han desarrollado muchos componentes electrónicos de distintos tamaños y formas, capaces de realizar diferentes funciones. Existen 2 grandes clasificaciones siendo separados por componentes activos y pasivos.

Los componentes pasivos son todos aquellos que no generan un aumento en el poder de ganancia, no tiene control de acción y solo requiere una señal para funcionar, sin embargo, se pueden manejar haciendo combinaciones de componentes para cambiar la fase de la señal y rechazar o desviar señales según su frecuencia. Por otro lado, se encuentran los componentes activos los cuales son capaces de controlar voltajes o corrientes, amplificar e interpretar señales, capaces de generar un cambio de ganancia en el circuito.

Componentes	
Activos	Pasivos
Diodos	Resistores
Transistores	Capacitores
Circuitos Integrados	Inductores

Tabla 1. Clasificación de algunos ejemplos de componentes electrónicos básicos.

Los componentes electrónicos también son diferenciados en la forma en el que unen a la placa PCB, encontrándose elementos PTH, SMD, de unión axial y radial, matriz de pines y elementos que son directamente unidos por terminaciones metálicas. Cada componente, a la vez, tiene su propia simbología para ser representado esquemáticamente, estos símbolos han sido estandarizados y especificados por el Instituto de Ingenieros Electrónicos y Eléctricos (IEEE) en la norma ANSI Y32.2.

3.4.2.1. Resistores

Es uno de los componentes pasivos más utilizados en la electrónica, su característica principal recae en la capacidad de ofrecer una oposición al flujo de corriente entre sus terminales, obedeciendo a la Ley de Ohm:

$$Resistencia [Ohm] = \frac{Voltaje [V]}{Corriente [A]} \quad (1)$$

Existen variedades de resistores de distintos materiales, los resistores de carbón hechos mezclando carbón finamente molido con resina y material aislante presentan un buen desempeño para señales de alta frecuencia, pero produce inestabilidad térmica. También los hay metálicos, este tipo de resistores son más tolerantes a los cambios de temperatura, su estructura se compone de una varilla de material cerámico o *metal glaze*, el cual se encuentra recubierto por un film metálico.

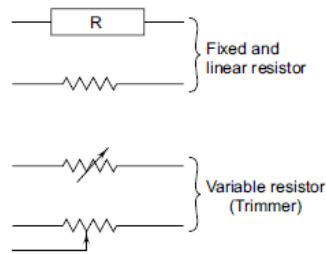


Figura 22. Simbología de un resistor y sus variantes.

Para lograr una rápida identificación es que se diseñó un sistema de código para cuantificar gráficamente el valor de la resistencia en los diferentes resistores. Este código consiste en bandas de colores alrededor de la resistencia que representan valores, factores y tolerancias numéricas. Comúnmente se observan hasta 5 franjas de colores, sin embargo, en elementos sofisticados se encuentra una sexta franja que representa el coeficiente de variación de temperatura en partes por millón por cada grado Celsius [ppm/°C].

Five Band Resistors				
1 st Band	2 nd Band	3 rd Band	4 th Band	
Black 0	Black 0	Black 0	Silver Divide by 100	 5th Band (tolerance)
Brown 1	Brown 1	Brown 1	Gold Divide by 10	
Red 2	Red 2	Red 2	Black Multiply by 1	
Orange 3	Orange 3	Orange 3	Brown Multiply by 10	
Yellow 4	Yellow 4	Yellow 4	Red Multiply by 100	
Green 5	Green 5	Green 5	Orange Multiply by 1,000	
Blue 6	Blue 6	Blue 6	Yellow Multiply by 10,000	
Violet 7	Violet 7	Violet 7	Green Multiply by 100,000	
Grey 8	Grey 8	Grey 8	Blue Multiply by 1,000,000	
White 9	White 9	White 9		
				Brown ± 1%
				Red ± 2%
				Gold ± 5%
				Silver ± 10%

Figura 23. Sistema de códigos utilizado para cuantificar el valor de la resistencia.

3.4.2.2. Potenciómetros

Los potenciómetros son resistores variables los cuales cuentan con una superficie móvil hecha de un material resistivo (carbón, cermet, bobinado de níquel-cromo) con la capacidad de amplificar o disminuir el valor de salida de una señal, por ejemplo, el volumen y brillo del televisor.

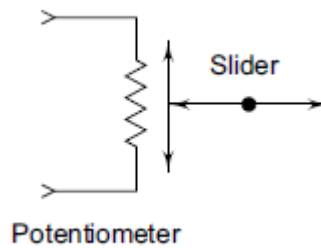


Figura 24. Simbología de un potenciómetro.

El efecto que tiene sobre la regulación de voltaje o corriente en un circuito puede seguir dos leyes según su construcción:

- Lineal (A): El material resistor se encuentra uniformemente en contacto con la superficie de contacto y la señal de salida tiene un comportamiento lineal.
- Logarítmica (B): El material resistor se encuentra unido a un interruptor deslizante el cual varía la señal de salida obedeciendo un comportamiento logarítmico.
- Sinusoidal: El material resistor se encuentra en una perilla la cual gira en 360° capaz de producir una señal de salida sinusoidal.

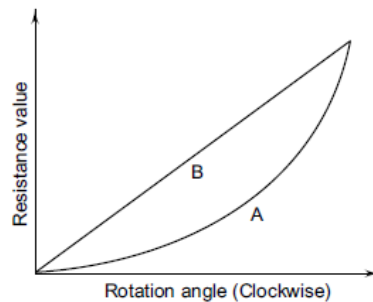


Figura 25. Variación la resistencia según ángulo.

3.4.2.3. Termistores

Los termistores son resistores que presentan una disminución en el valor de su resistencia al presentar un incremento en el cambio de temperatura, aquellos que presentan un aumento de su resistencia se llaman “*positores*”. Es posible encontrarlos en forma de cilindros y discos para ser utilizado en distintas configuraciones de PCB, comúnmente están hechos de óxidos de metales como el cobalto, magnesio y níquel.

Dentro de algunas aplicaciones donde se encuentra el uso de termistores son en el control del flujo de la corriente en los circuitos y como termo sensores para controlar el sobrecalentamiento en ciertas áreas.

3.4.2.4. Capacitores

Los capacitores o condensadores están conformados por 2 placas o caras de material llamados electrodos, los cuales son separados por un aislante o material dieléctrico que puede ser papel, mica, cerámico, electrolítico o plástico. Esta configuración le otorga la capacidad de almacenar cierta cantidad de carga para luego ser liberada.

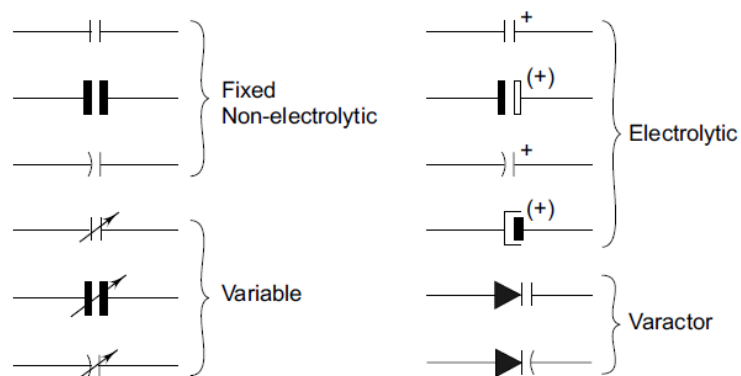


Figura 26. Muestra la simbología de un capacitor y sus variantes.

La capacitancia o la capacidad de almacenar dicha carga se mide en Faraday [F] y representa la cantidad de energía necesaria para cargar a 1[V] el capacitor. La representación de la capacitancia en los elementos electrónicos no se encuentra tan normalizada como la de los resistores, y es por ello por lo que distintos fabricantes tienen su propia forma de representación, tanto esquemáticamente a través de colores o a través de la impresión directa del valor numérico sobre el capacitor.

3.4.2.5. Inductores

Los inductores son dispositivos que tienen inductancia o la capacidad de oponerse al cambio en flujo de corriente que pasa a través de una bobina. Cuando una corriente atraviesa un embobinado se produce un campo magnético en dirección del flujo de la corriente, siguiendo la regla de la mano derecha. Si se produce una perturbación en el flujo de la corriente produce un cambio en el campo magnético y se induce una Fuerza Electromotriz (FEM) que trata de mantener la corriente.

La inductancia de un elemento electrónico se mide en Henry y representa la cantidad de voltaje que se induce (FEM) en el elemento al producirse una variación en el flujo de corriente de 1 [A/s] (ampere por segundo). El valor de la inductancia es físicamente representado a través de líneas de colores o a través de la impresión de su valor numérico directo sobre la superficie del inductor.

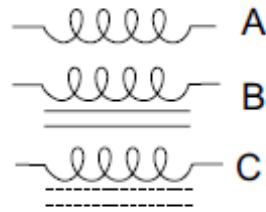


Figura 27. Simbología de un inductor y sus variantes.

3.4.2.6. Diodos

Un diodo es un elemento electrónico que permite el flujo de corriente en una sola dirección. Se compone de un material semiconductor que consta de dos electrodos: uno es n-semiconductor y otro es p-semiconductor. La unión de ambos materiales le proporciona la capacidad de funcionar como switch, detector y rectificador de señales.

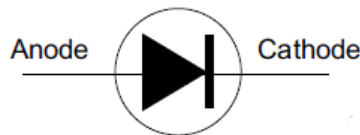


Figura 28. Simbología de un diodo.

La naturaleza de estos semiconductores se consigue a través del “*doping*”, que es un proceso que consiste en agregar impurezas a los materiales semiconductores para alcanzar una determinada conducción y estructura. En los tipos n se utiliza fósforo o arsénico, los cuales poseen 5 electrones en su orbital más lejano. Mientras dichos electrones no tengan nada a que unirse, pueden moverse libremente y permitir el flujo de corriente eléctrica a través del material. Por otro lado, los tipos p se utiliza boro o galio, los cuales poseen 3 electrones en su orbital más lejano. Al introducirse en el material semiconductor los electrones son atrapados cargando positivamente el semiconductor. La diferencia recae en la dirección en que fluyen los electrones.

3.4.2.7. Transistores

El transistor es uno de los elementos semiconductores más utilizados en las PCB, su estructura básica consta de la unión de dos diodos, lo cual le otorga la capacidad de realizar funciones de switch, ganancia y rectificador de señales. Su unión a la placa es a través de 3 terminales: un colector (C), un emisor (E) y un base (B). El terminal base se encarga de enviar una señal para permitir o restringir el flujo de corriente y según como se encuentre dispuesta definirá la polarización del transistor.

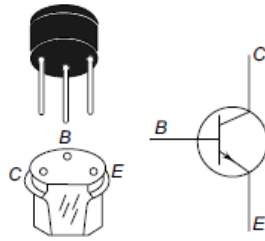


Figura 29. Concepto básico y simbología de un transistor.

Dada la naturaleza del material semiconductor es que se pueden configurar dos arreglos básicos de transistores como los son los NPN y PNP. Su diferencia principalmente recae en los materiales su manufactura y su ordenamiento en las capas de los semiconductores p y n, esto implica que se deba tener en consideración la polaridad de los terminales, ya que en un transistor NPN la corriente de salida fluye desde el colector al emisor, mientras que en un transistor PNP la corriente de salida fluye desde el emisor al colector.

3.4.2.8. Tiristores

Se les llama tiristor a la familia de componentes que están en el control de poder de los circuitos, sus usos más comunes están en el control de corriente alterna, regulador de la intensidad lumínica, control de velocidad en motores, control de temperaturas y como dispositivo de seguridad en aparatos de corriente directa.

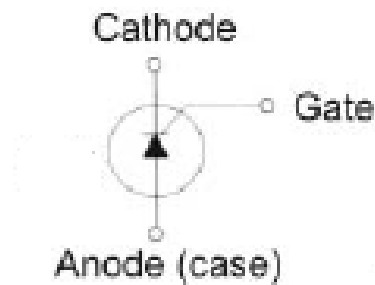


Figura 30. Simbología de un tiristor.

Su estructura básicamente consta de la unión de cuatro capas alternadas de materiales semiconductores p y n con tres terminales. Esta combinación puede ser representada por la unión de un transistor NPN y uno PNP, la base del transistor NPN está conectada a el colector del transistor PNP, mientras que la base del transistor PNP está conectada al colector del transistor NPN. Una vez que una señal es recibida por el tiristor pasa de un estado de apagado a permitir el flujo de corriente y mantenerla hasta que la señal disminuya su valor con lo que es posible controlar la magnitud de las señales de salida.

3.4.2.9. Circuitos Integrados

Un circuito integrado (IC) contiene en su interior arreglos electrónicos compuesto por resistencias, capacitores, inductancias y otros elementos electrónicos que se encuentran compactados dentro de un solo paquete reduciendo considerablemente la densidad de elementos electrónicos en las PCB. Hay principalmente dos tipos de IC: Lineales y Digitales.

Los Circuitos Integrados Lineales (LIC) se caracterizan por ofrecer una señal de salida amplificada según su señal de entrada. Dentro de los LIC existen familias como: amplificadores operacionales, amplificadores diferenciales, amplificadores de audio y video, amplificadores de instrumentación y convertidores de analógico a digital (A/D), siendo cada uno comercializado en paquetes pequeños y compactos.

Los Circuitos Integrados Digitales (DIC) son ampliamente utilizados en control industrial, instrumentos electrónicos, sistemas de comunicación y equipos médicos, debido a que ofrecen la capacidad de operar bajo lógicas llamadas “puerta” (GATE) de “si” y “no” bajo valores definidos de voltajes. Convencionalmente existe la lógica positiva y la lógica negativa, se diferencian para representar de distinta manera a que terminales se le asigna el valor más alto de voltaje y a cuál el de menor voltaje.

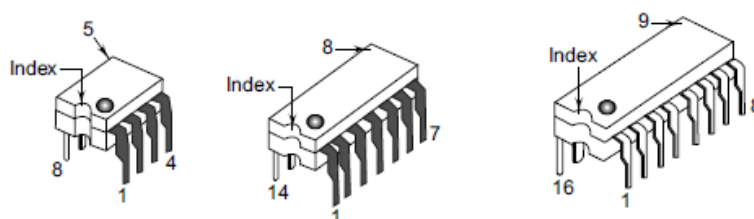


Figura 31. Representación básica de un IC con distintos pines.

Los circuitos integrados vienen en distintos tipos y formas siendo calificados según sus terminales de conexión y la cantidad de funciones lógicas que puede realizar:

- **SII (Small Scale Integration):** Puede realizar un equivalente a 12 operaciones lógicas y se encuentran en formatos de 14 o 16 pines en Dual-Line Packages (DIP) o en Flat Packs.
- **MSI (Medium Scale Integration):** Puede realizar un equivalente de entre 12 y 100 operaciones lógicas y se encuentran en formatos de 24 pines en DIP y 28 pines en Flat Packs.
- **LSI (Large Scale Integration):** Pueden realizar sobre 1000 operaciones lógicas se incluyen circuitos de memorias y circuitos de microprocesadores.
- **VLSI (Very Large Scale Integration):** Realizan sobre 10000 operaciones lógicas, incluyen a las Memorias de Acceso Remoto (RAM).

Para identificar y entender un IC usualmente vienen acompañados de un diagrama esquemático donde se identifica la conexiones y lugar de cada pin. Además, sus datos técnicos vienen sobre la superficie del IC, donde se puede identificar su código el cual indica la familia lógica, subfamilia lógica y sus funciones.

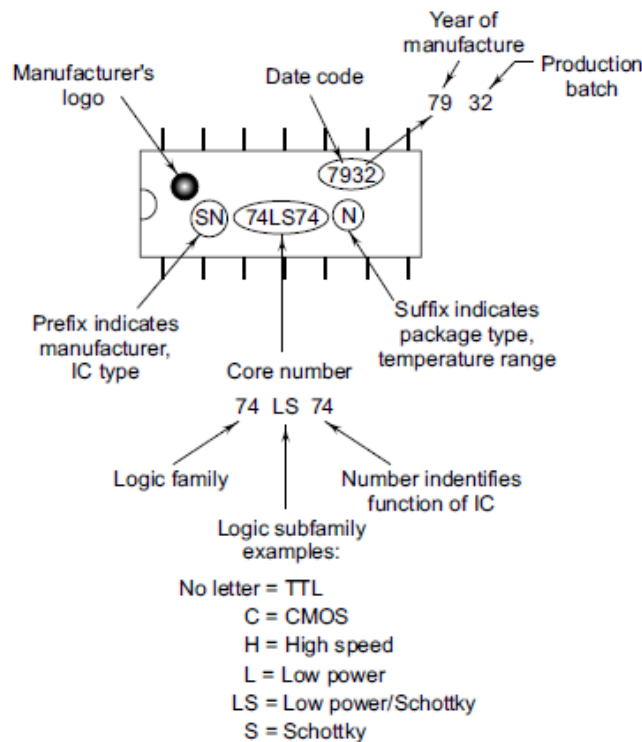


Figura 32. Representación de los datos técnicos impresos en un IC.

3.4.2.10. Microprocesadores (CPU)

También conocidos como CPU (Central Processing Unit) es un circuito integrado que pueden contener hasta 10 millones de transistores compactados en un simple chip. El primer microprocesador de computadores fue hecho en casa por Intel, que en 1974 introdujo el Intel 8088 para la primera computadora de 8 bits, sin embargo, el microprocesador que revolucionó la industria fue el Intel 8088 en 1979 introducido por los PC de IBM, los cuales estuvieron comercialmente disponibles en 1982.

El microprocesador es la parte más importante de una computadora, ya que se encarga de ejecutar una serie de instrucciones, lo que le indica al procesador exactamente qué hacer. Los microprocesadores comunes pueden realizar 3 acciones básicas como, usando una Unidad Lógica Aritmética (ALU) son capaz de realizar operaciones matemáticas de adición, resta, multiplicación, división. También tiene la capacidad para mover información de la memoria de un lugar a otro y puede ejecutar nuevas instrucciones basándose en el resultado de las decisiones anteriormente tomadas. Su función principal es manipular la información acorde a la información

almacenada en la memoria, transfiriendo e internalizando el estado de la información por una vía bidireccional de 8 bit.

3.4.2.11. Memorias Semiconductoras

Una memoria en electrónica se entiende como un arreglo de almacenamiento binario organizado en sets de “palabras memoria” (memory words) al cual se puede acceder externamente. Cada memory word consiste en caracteres de 1 bit llamados celdas de memoria, y la capacidad de almacenamiento de la memoria es el producto del número de memory words y el número de memory cells en cada memory word, comúnmente se mide en kilobits, donde $1[\text{Kbit}] = 2^{10} = 1024 [\text{bit}]$.

Dentro de los sistemas basados en la utilización de microprocesadores se encuentra el uso de dos tipos de memoria: Read-Only Memory (ROM) y Random Access Memory (RAM).

3.4.2.11.1. RAM

Las memorias RAM es usada para almacenar información variable dentro de los sistemas de micro procesamiento. La CPU es capaz de poder modificar, mover y reescribir el contenido en las celdas de memoria a voluntad. Este tipo de memoria se separa en 2 categorías: RAM dinámicas y RAM estáticas.

- **RAM Dinámica:** La información es almacenada en forma de carga eléctrica en las capacitancias de los transistores MOS (Metal Oxide Semiconductor). Debido a la que los capacitores no son ideales y suele haber pequeñas fugas de carga, es posible que se pierda la información almacenada si no es actualizada cada cierto tiempo. Por otro lado, en su manufactura ofrecen una elevada densidad de elementos electrónicos y bajos costos de fabricación.
- **RAM Estática:** La información no necesita ser actualizada, ya que, al momento de almacenarse la información, esta es escrita sobre la memoria y una vez que es requerida por la CPU es obtenida y leída. El almacenamiento y escritura de la información es llevada a cabo bajo “ciclos de escritura” (write cycle), mientras que la lectura de información se hace bajo “ciclos de lectura” (read cycle), donde cada ciclo viene dado por el periodo de tiempo que es requerida para escribir o leer la información según el caso. La información es almacenada en niveles de voltaje, donde ciertos valores indican en lenguaje binario el 1 o el 0 dependiendo del arreglo y configuración de la memoria.

3.4.2.11.2. ROM

Las memorias ROM son usadas normalmente para mantener la información e instrucciones constante, proporciona seguridad contra rescritura, modificación y perdida de la información, solo siendo posiblemente alterado bajo acciones o modificaciones especiales. Se distinguen cinco tipos de ROM básicas:

- **Mask-programmed ROM:** Este tipo de ROMs son diseñadas para operaciones especiales para el cliente según sus requerimientos, una vez fabricada no puede ser alterada, consumen poca energía y poseen alta confiabilidad.
- **Programmable ROM (PROM):** Este tipo de ROMs son fabricadas para poder ser modificadas y programadas por el usuario, disponiendo libremente de los pins y links de conexión. Solo pueden ser programadas una vez siendo más frágiles que las ROMs tradicionales a choques electrostáticos. El costo de una PROM en blanco es bajo y se pueden hacer prototipos de ROMs antes de asumir su costo de fabricación.
- **Erasable PROM (EPROM):** Este tipo de ROMs permite rescribir la información de manera no selectiva, es decir, al momento de querer reprogramar la EPROM la información previamente almacenada es eliminada por completo. Esto se realiza a través de rayos UV.
- **Electrically EPROM (EEPROM):** Los contenidos de memoria son almacenado bajo distintos niveles de voltaje y pueden ser modificados independientemente, pero es un proceso lento que por lo general no se utiliza dentro de los circuitos lógicos.
- **Flash Memory:** Es un tipo de EEPROM que utiliza campos eléctricos en localizaciones específicas o cuadras dentro de la ROM, permitiendo modificar la información más rápido que una EEPROM.

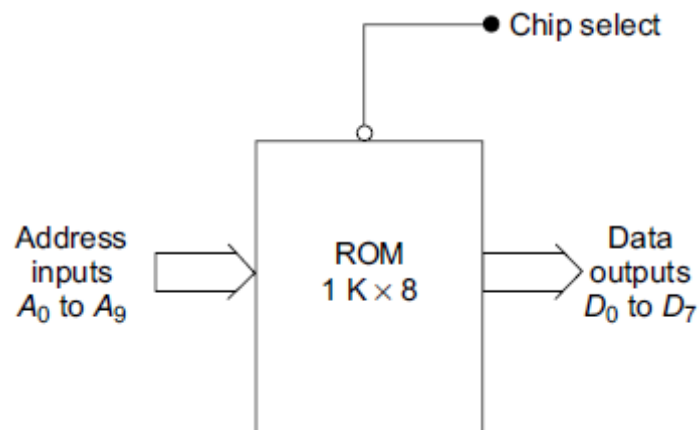


Figura 33. Simbología básica de una ROM de 1024-8 bit.

3.4.2.12. Microcontroladores

Los microcontroladores son microcomputadores que en su interior contiene una CPU, ROM Flash y RAM. Este tipo de dispositivos no requieren asociarse a otros dispositivos para operar. Comúnmente vienen en paquete de 40 pines y se comercializó por primera vez cuando Intel introdujo en 1976 el MCS-48, un microcontrolador de 8 bit.

3.4.2.13. Dispositivos de montaje en superficie (SMD)

Convencionalmente las PCB fueron manufacturadas bajo la THT (through holes technology), en consecuencia, sus diferentes componentes y dispositivos fueron diseñados para ser montados y unidos bajo esas características. Sin embargo, la aparición de la Surface Mount Technology (SMT), revolucionó la forma en que se fabricaban los distintos dispositivos, mejorando la densidad de elementos en las PCB y la reducción en el tamaño de las PCB, por lo cual son altamente demandados para los productos portátiles que requieren ser cada vez más pequeños.

Los elementos que ocupan la tecnología SMT son llamados Dispositivos de Montaje por Superficie o SMD siendo utilizados principalmente en resistores, capacitores cerámicos y semiconductores con un 80% del total de SMDs disponibles comercialmente. Para que los dispositivos se adhieran a las PCB existen distintas configuraciones y formas, dependiendo del elemento electrónico.

Type	Drawing	Components
Gull-wing		SOIC QEP TSOP
J-lead		PLCC SOJ
Ball		BGA Chip Scale Flip Chip (Bump)
Metallized Terminations		Capacitors Resistors Ferrites

Figura 34. Muestra las terminales de unión más comunes en los SMD.

3.4.2.14. Disipadores de calor

Los disipadores de energía son utilizados en los circuitos electrónicos generalmente para prevenir el sobrecalentamiento de áreas u otros elementos electrónicos manteniendo la temperatura dentro de límites específicos. Usualmente los dispositivos que generan calor son diseñados con una superficie de contacto con una

película de lubricante para ser montado un disipador de calor y facilitar el flujo de calor hacia el exterior.

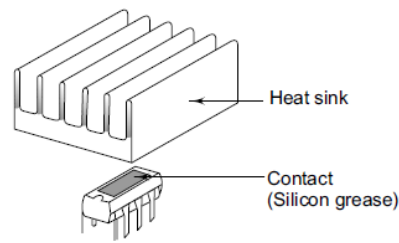


Figura 35. Esquema básico de un disipador a un elemento electrónico.

3.4.2.15. Transformadores

Un transformador es un dispositivo electrónico que transforma la energía eléctrica dispuesta en un circuito a un segundo circuito a través de la inducción electromagnética, obteniéndose diferentes niveles de voltaje y corriente, pero con la misma frecuencia que la del circuito de origen. La transformación se produce al tener un circuito primario alimentado por una fuente de voltaje AC posee una bobina que induce un voltaje en la bobina del circuito secundario, ambas bobinas se encuentran adyacentes la una de la otra unidos por un núcleo de hierro el cual trasporta las ondas electromagnéticas y se encuentran enrolladas las bobinas. La relación entre los voltajes primario y secundarios obedecen la ley de Faraday que viene dada por la ecuación:

$$\frac{\text{Tension secundaria } (V_S)}{\text{Tension primaria } (V_P)} = \frac{n^{\circ} \text{ espiras bobina secundaria } (N_S)}{n^{\circ} \text{ espiras bobina primaria } (N_P)} \quad (2)$$

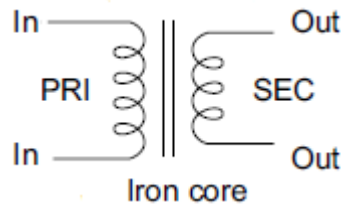


Figura 36. Simbología de un transformador con núcleo férreo.

3.4.2.16. Relés

Un relé es un dispositivo electromagnético el cual cuenta con un solenoide que es energizado en un circuito y dependiendo del nivel de la señal es capaz de funcionar para abrir o cerrar contactos electrónicos de un circuito completamente diferente. Los contactos inicialmente pueden estar en estado de cerrado o abierto los cuales al momento de cargarse el solenoide cambian al estado opuesto.

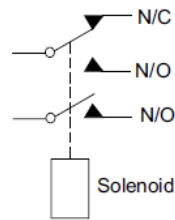


Figura 37. Simbología básica de un solenoide.

3.4.2.17. PCB Standards

A nivel internacional distintos organismos han buscado estandarizar las características y atributos que debe tener una PCB con el fin de facilitar el entendimiento, venta, compra y desarrollo a nivel global de estas tecnologías. De acuerdo con la Organización Internacional de Estandarización (ISO) se define como estándar: *“Acuerdo documentado que contiene especificaciones técnicas u otro criterio para ser utilizado constantemente como regla, guía o definición de características, para asegurar que los materiales, procesos y servicios encajan entre sí para su propósito.”*

Dos organismos internacionales se encargan de la estandarización de las PCB, por un lado, la ISO se encarga de la calidad, hardwares y estandarizaciones numéricas, y por otro, la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) quien se encarga de los componentes, conectores, PCBs, tecnologías de montaje y diseños de automatización.

Sin embargo, estas entidades se apoyan en organizaciones más pequeñas, como el Instituto para la Interconexión y Packing de Circuitos Electrónicos (IPC), el cual ha hecho un significativo aporte con una serie de indicaciones para la estandarización de PCBs, tales como:

- **IPC-T-50-F: “Terms and Definitions for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits”:** Presenta descripciones e ilustraciones para ayudar a los usuarios al entendimiento universal, incluye acrónimos y terminologías usadas en las tecnologías de PCB.
- **IPC-S-100: “Standards and Specifications Manual”:** Presenta una compilación completa acerca de las tecnologías de interconexión, desde el diseño, ensamblaje y testeo.
- **IPC-M-106: “Technology Reference for Design Manual”:** Presenta los diseños de tecnologías de impresión de placa como interconexiones de alta densidad, diseño de placas flexibles, impedancia controlada para el enrutamiento, el uso de herramientas fotográficas para el diseño y confiabilidad de la impresión del circuito.

-
- **IPC-D-859: “Design Standard for Thick Film Multi-layer Hybrid Circuits”:** Presenta los requerimientos y consideraciones para el diseño de PBCs multicapas con circuitos híbridos.
 - **IPC-6801: “IPC/JPCA Terms and Definitions, Test Methods, and Design Examples for Build-Up/High Density Interconnect (HDI) Printed Circuit Boards”:** Presenta una lista de especificaciones para la interconexión de alta densidad (HDI), incluye lista de materiales, métodos de testeo, criterios e información para el desarrollo de PCBs con HDI.
 - **IT-30101: “High Density PCB Microvia Evaluation”:** Presenta detalles sobre el manejo y aplicaciones adecuadas de las tecnologías de micro vías de alta velocidad/frecuencia.
 - **IPC-MI-660: “Incoming Inspection of Raw Materials Manual”:** Presenta información y aplicaciones específicas acerca de métodos de testeo, inspección y evaluación de materias primas como, el laminado, material base aislante, resistencias, revestimientos, químicos, materiales de soldadura, etc.
 - **IPC/JEDEC J-STD-020B: “Moisture/Reflow Sensivity Classification for Non-hermetic Solid State Surface Mount Devices”:** Identifica los niveles de clasificación para los SMDs no herméticos que son sensibles a la humedad y los recubrimientos para una elaboración a altas temperaturas.
 - **IPC/JEDEC J-STD-033A: “Handling, Packing, Shipping and Use of Moisture/Re-flow Sensitive Surface Mount Devices”:** Proporciona métodos estandarizados para los fabricantes y usuarios de SMDs para su manejo, ensamblaje, transporte.
 - **IPC-DRM-18F: “Component Identification Desk Reference Manual”:** Contiene graficas en 3D y una descripción completa de los 40 elementos electrónicos más utilizados en THT y SMT. También incluye terminologías relacionadas con la polaridad, orientación, packing y estilos de terminales de conexión de distintos elementos electrónicos.
 - **IPC-TA-723: “Technology Assessment Handbook on Surface Mounting”:** Contiene 71 artículos relacionados a la SMT incluyendo packing, conceptos, consideraciones de diseño, materiales para el packing, consideraciones de manufactura, calidad y confiabilidad de ensambles.

3.4.3. Soldadura en PCB

La soldadura con aporte de material blando es un proceso el cual consiste en la unión de dos partes metálicas usando como material de aporte una aleación metálica que posee un punto de fusión menor al punto de fusión de los metales a unir, produciendo una unión intermolecular entre el material de aporte fundido y las piezas que se desean unir, sin la necesidad de que ambos sean fundidos.

Este tipo de soldadura es clasificado como “blanda” debido a que el proceso de soldadura, por lo general, alcanza una temperatura por debajo de los 450 [°C], a diferencia de la soldadura tradicional como los anteriormente descritos en la sección 3.3. Sin embargo, en ambos procesos de unión térmica son considerados como procesos de soldadura, ya que en ambos casos el material fundido se utiliza para la unión de dos superficies metálicas.

Una de las principales ventajas que ofrece la unión mediante soldadura, es que se puede obtener una sola pieza continua, a diferencia de que, si estuviera unida mediante tornillos o remaches, los cuales suelen desarrollar óxidos o sulfatos en las superficies de contacto, lo que provoca deficiencia en sus propiedades estructurales, mecánicas, térmicas y conductivas.

3.4.3.1. Soldabilidad

La soldabilidad es la capacidad que tiene un metal o aleación para soldarse a otro material y que cumpla satisfactoriamente con las propiedades mecánicas requeridas para el trabajo solicitado. Los principales factores que influyen en la soldabilidad son: el proceso de soldadura, las propiedades del metal base, metal de relleno y las condiciones superficiales. En el proceso de soldadura se deben dar las condiciones óptimas de velocidad de deposición, tiempo de aplicación del calor y temperatura alcanzada durante el proceso. Las propiedades de los metales a unir deben ser compatibles en sus puntos de fusión, diferencias significativas en su resistencia o coeficiente de expansión térmica provoca altas tensiones residuales que generan grietas. Por otro lado, las condiciones superficiales de los metales pueden afectar adversamente el proceso provocando porosidades y una mala fusión entre los metales.

3.4.3.2. Soldadura Blanda

Es esencial entender que sucede realmente al interior de los metales durante el proceso de soldadura y los distintos parámetros que se necesitan controlar y tener en consideración para lograr una correcta unión entre las piezas.

Durante la deposición del material metálico de aporte se produce una penetración en la superficie de cobre dispuesta en los circuitos de las placas PCB formando una nueva aleación, producida por la unión intermolecular de la mezcla de ambos metales. La formación de una correcta unión intermolecular determinará las propiedades mecánicas y conductivas de la unión y dependerá principalmente de la limpieza de impurezas y óxidos que pueden estar presentes en la superficie que se desea soldar como también la temperatura a la que se produce la unión.

La tensión superficial propia de una sustancia líquida representa la fuerza de cohesión que existen entre moléculas del mismo material, comúnmente se aprecia este fenómeno en el agua. En el caso de la aleación como las de estaño y plomo la fuerza cohesiva es aún mayor que en el agua, lo cual genera que al momento de fundirse el material de aporte este tiende inmediatamente a tomar una forma esférica, la cual

representa el estado de mínima energía, debido a que una esfera es el cuerpo geométrico que presenta la menor superficie para un mismo volumen determinado, con lo cual es importante controlar la temperatura para lograr una correcta fluidez y deposición del material de aporte.

La unión intermolecular del estaño junto con el cobre forma granos cristalinos, cuyo tamaño y forma es determinada por la duración y la intensidad de la temperatura en el proceso de soldadura. Una mesurada aplicación térmica resulta en una fina estructura cristalina, lo cual produce una excelente unión con una resistencia mecánica optima, al contrario, si la aplicación térmica es demasiado prolongada en tiempo y/o elevada temperatura formará una estructura cristalina de grano grueso logrando una menor resistencia mecánica. Con el cobre como material base y el estaño/plomo como material de aporte blando se produce una unión intermolecular Cu_3Sn o Cu_6Sn_5 en donde el estaño se une al cobre, pero el plomo no. El plomo tiene la función de eliminar residuos óxidos que puede presentarse debido a factores externos del ambiente en donde se desenvuelve el proceso de soldadura.

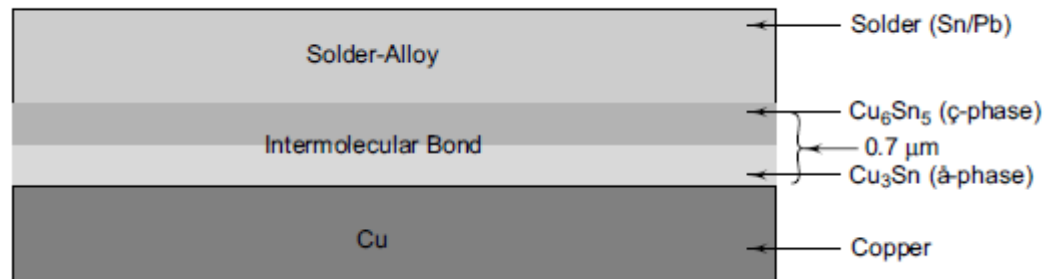


Figura 38. Esquema representativo de la unión intermolecular del Cu y Sn.

La capa metálica resultante de la unión intermolecular debe ser lo suficientemente delgada como para mantener una óptima resistencia mecánica, ya que presenta una disminución en la resistencia al aumentar el espesor de la capa en la unión intermolecular, por lo cual se recomienda no sobrepasar espesores de $1\ \mu\text{m}$. El espesor de la capa en la unión está influenciado por la temperatura y tiempo en que se demora en formar la unión, idealmente se recomienda que la soldadura se realice a una temperatura de entre 250 y $330\ ^\circ\text{C}$. De no contar con una apropiada aplicación de temperatura y tiempo es posible que se desarrollen discontinuidades en la unión susceptibles a cizalladura.

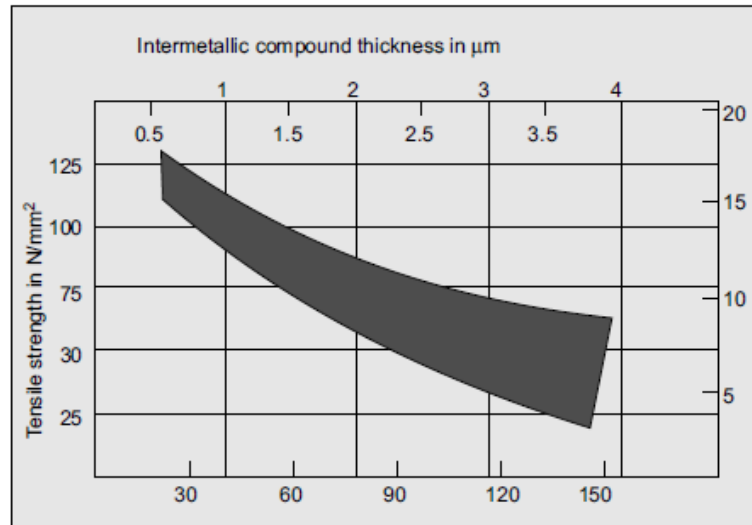


Figura 39. Relación entre la resistencia a la tracción y espesor de la unión intermolecular.

3.4.3.3. Variables en el Proceso de Soldadura en PCBs

Sea soldadura blanda o tradicional es importante tener en consideración, ya que son controlables, las variables de tiempo, temperatura, limpieza en las superficies de contacto y soldadura apropiada.

La temperatura y el tiempo de aplicación de calor tienen influencia directa sobre la creación de la estructura cristalina y la unión intermolecular de ambos metales, de esto depende que tan resistente y duradera será la unión entre las piezas. La temperatura que se alcance en el proceso de soldadura tiene relación directa con el punto de fusión del metal que se desea fundir, para cada aleación con soldadura blanda y cobre existe una temperatura crítica con la cual la unión intermolecular no logra formarse, por lo que se sugiere que el proceso de soldadura se realice a 40 a 85 [°C] por sobre el punto de fusión del material utilizado como aporte en la soldadura blanda y con una aplicación de calor lo menos prolongada posible.

Para que material de aporte blando pueda penetrar las superficies que se desean unir es necesario contar con una limpieza total, libre de cualquier impureza, aceite o capa de óxido, ya que estas pueden quedar atrapadas dentro de la soldadura produciendo un mal desempeño y eventualmente la falla. Para evitar la presencia de estos agentes, es que se utiliza gases, pastas o fluidos durante el proceso de soldadura que ayudan durante el proceso a mantener una atmosfera libre de óxidos, sulfatos y carbonatos.

3.4.3.4. Materiales para Proceso de Soldadura en PCBs

Para llevar a cabo el proceso de soldadura se necesitan distintos materiales para lograr un resultado satisfactorio. A continuación, se describen en su mayoría.

3.4.3.4.1. Soldadura

El material empleado usualmente para la unión de elementos electrónicos a PCBs consiste en una aleación de plomo (Pb) y estaño (Sn) cuyas proporciones pueden variar dependiendo del propósito que se desee, también en algunos casos se añade antimonio (Sb), plata (Ag), cadmio (Cd) o bismuto (Bi) con el fin de variar sus propiedades físicas y mecánicas. El plomo dispuesto en la aleación no representa riesgos para el usuario, sin embargo, se recomienda el uso de mascarilla en casos de una prolongada exposición a vapores de plomo.

Cuando el estaño es añadido al plomo (figura 40), el punto de fusión del plomo cambia y disminuye siguiendo la línea PR, un comportamiento similar se observa si es el plomo añadido al estaño, cuyo punto de fusión sigue la línea QR. En el punto R es donde se encuentra la aleación con el menor punto de fusión, correspondiente a la proporción de Pb37% y Sn63% con un punto de fusión es de 183 [°C], cuya principal característica recae en la composición eutéctica de la aleación, facilitando el cambio de fase desde uno sólido a líquido eliminando la transición de deformación plástica del metal. Se abrevia y conoce comúnmente como soldadura SN63.

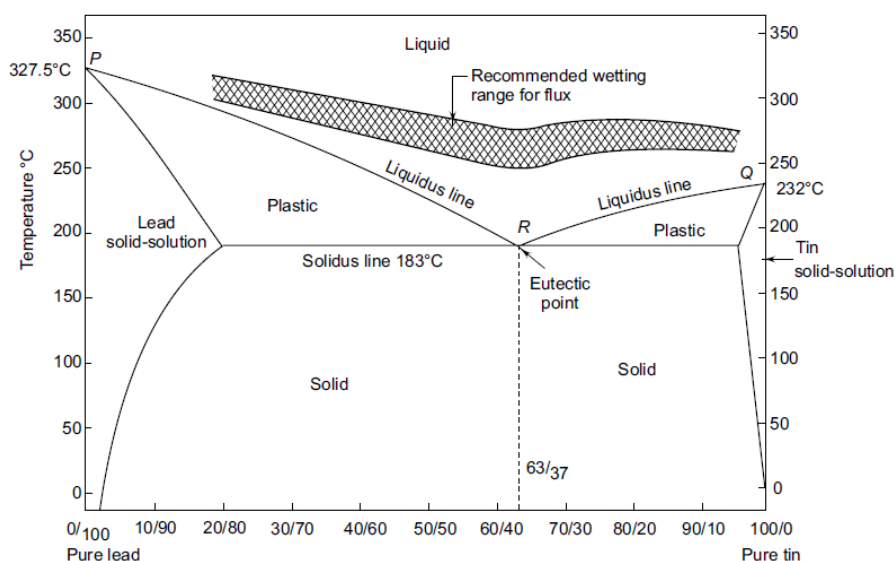


Figura 40. Diagrama de fases de estado de la aleación estaño plomo.

Para efecto de soldadura en PCBs el tipo de soldadura que se encuentra comúnmente dispuesto en el comercio es la aleación que contiene 40% de plomo y 60% de estaño dispuesta en forma de alambre cuyo interior también contiene una pasta orgánica llamada colofonia o resina, que facilita la fluidez de la aleación y limpieza de la atmosfera. La aleación tiene un punto R de fusión de 190 [°C] y se encuentra en distintos diámetros, siendo preferible los más delgados debido a que requieren menor tiempo y calor para ser fundidos.

El nivel de impurezas o metales adicionales permisibles en la soldadura de estaño y plomo es más importante que lograr una proporción exacta en la aleación, debido a que tiene una gran influencia sobre la calidad de la soldadura. De no considerar una adecuada proporción en la mezcla se producen grietas, mala adherencia y una eventual falla. El aluminio, cadmio, zinc y fósforo facilita la oxidación de la superficie de la soldadura y tiene efectos negativos sobre la formación de la unión intermolecular, mientras que el antimonio y bismuto presentan menor oxidación y su concentración no afecta la formación de la unión intermolecular. A nivel internacional la proporción de impurezas en la aleación se pueden encontrar en las normas DIN 1707 de Alemania y la QQ-571d de EE. UU.

Contaminant	QQ-S-571/JISZ-3282*	New Solder, %	Contamination Limits, %
Aluminum	0.005	0.003	0.006
Antimony	0.500/0.300	0.300	---
Arsenic	0.030	0.020	0.030
Bismuth	0.200/0.050	0.006	---
Cadmium	0.005	0.001	0.005
Copper	0.080/0.050	0.010	0.250
Gold	0.080/0.001	0.001	0.080
Iron	0.020/0.030	0.001	0.020
Silver	0.010/0.001	0.002	0.010
Zinc	0.005	0.001	0.005
Others	0.080/0.010	0.010	0.080

Figura 41. Límite de contaminantes permitidos y establecidos en la especificación QQ-S571 de la norma QQ-517d.

3.4.3.4.2. Pastas y Fluidos (Flux)

Estos elementos son utilizados con el fin de asistir el proceso de soldadura para garantizar un ambiente óptimo para una unión de las piezas.

La mayoría de los metales tienden a desarrollar en su superficies una capa delgada de óxido al estar expuestos al oxígeno atmosférico incluso a temperatura ambiente, es por ello que se utilizan pastas o fluidos, cuyo propósito es remover químicamente las capas microscópicas de óxidos presentes en la superficie de los metales que son soldados y prevenir la re oxidación durante el proceso hasta lograr la fusión del metal, además como acción adicional favorece a la transferencia de calor en la superficie de los metales a soldar.

Para una correcta elección de pasta o líquidos para asistir el proceso de soldadura se sugiere que cumpla las siguientes características:

- Debe disponerse en tal estado de forma que sea fácil su esparcimiento en la superficie (dentro del alambre, pasta o fluido).

-
- Debe tener baja tensión superficial para poder humedecer y fluir fácilmente a través de las rugosidades de la superficie.
 - Debe empezar a actuar entre los 80 y 100 [°C].
 - No debe contener compuestos tóxicos.
 - No debe dejar residuos después del proceso de soldadura.

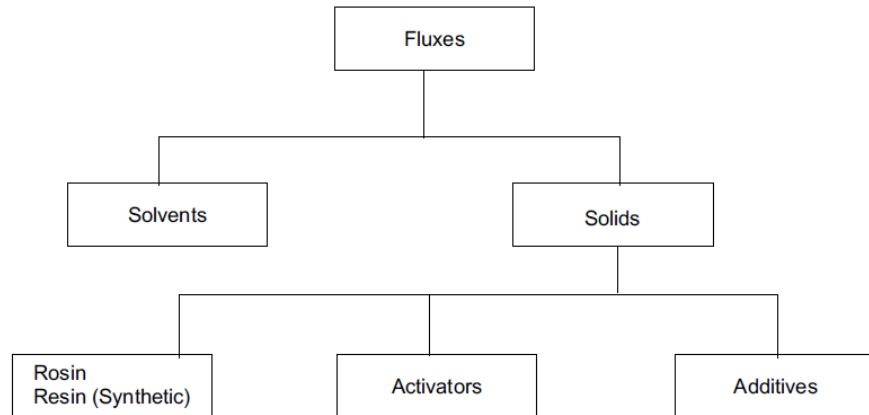


Figura 42. Diagrama de la composición de un flux.

La composición de estos elementos está conformada por una parte sólida que actúa como activador y un solvente que funciona como medio de transporte para el activador una vez fundido. Algunos agentes sólidos que son incorporados al flux son los aditivos para reducir la tensión superficial y aumentar la fluidez, los activadores que se descomponen con el calor liberando ácidos como el amonio o clorhidrato que reaccionan químicamente con los óxidos en la superficie eliminándolos y la resina o colofonia que es extraído del pino (*pinus palustris*) contiene ácido abiético y se encarga de controlar la actividad del flux. Los diferentes tipos de flux son especificados en la norma IPC-J-004 diferenciando tres clases L, M y H (low, medium, high) según su nivel de actividad definida por su capacidad natural anticorrosiva.

Flux Type Symbol	Flux Materials of Composition	Symbol	Flux Activity Levels (% Halide)	Flux Type
A	Rosin	RO	Low (0 %)	L0
B			Low (< 0, 5 %)	L1
C			Moderate (0 %)	M0
D			Moderate (0, 5-2 %)	M1
E			High (0 %)	H0
F			High (> 2 %)	H1
G	Resin	RE	Low (0 %)	L0
H			Low (< 0, 5 %)	L1
I			Moderate (0 %)	M0
J			Moderate (0, 5-2 %)	M1
K			High (0 %)	M0
L			High (> 2 %)	H1
M	Organic	OR	Low (0 %)	L0
N			Low (< 0, 5 %)	L1
P			Moderate (0 %)	M0
Q			Moderate (0, 5-2 %)	M1
R			High (0 %)	H0
S			High (> 2 %)	H1
T	Inorganic	IN	Low (0 %)	L0
U			Low (< 0, 5 %)	L1
V			Moderate (0 %)	M0
W			Moderate (0, 5-2 %)	M1
X			High (0 %)	H0
Y			High (> 2 %)	H1

Figura 43. Tabla de los flux dispuestos en la norma IPC-J-004.

3.4.3.4.3. Cabezal Soldador o Cautín.

Comúnmente para la soldadura blanda manual de elementos electrónicos se utiliza un cautín o cabezal soldador que se encarga de suministrar el calor necesario para fundir y producir la unión entre los metales. Consta de tres partes esenciales: mango, fuente de calor y boquilla.

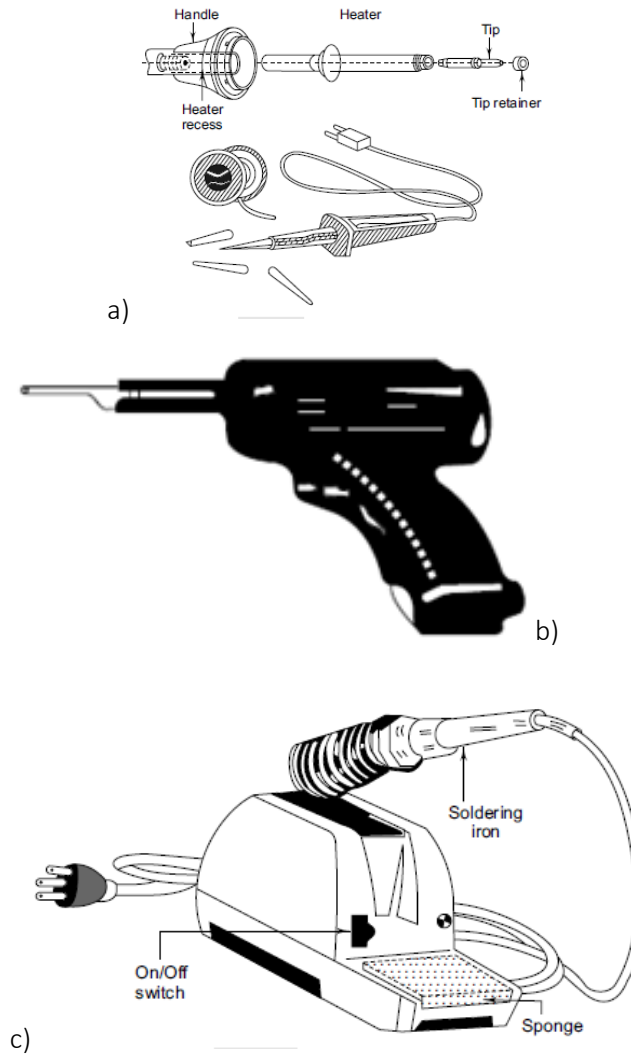


Figura 44. Muestra los elementos básicos de un cautín manual (a), pistola soldadora (b) y estación de soldadura (c).

El mango es manufacturado con materiales aislantes para proteger al operador del calor y electricidad, también es moldeada ergonómicamente para la comodidad del usuario. La fuente de calor comúnmente es una resistencia eléctrica, eléctricamente aislada que genera el calor y cuenta con un microcontrolador que detecta, controla y regula la diferencia de temperatura entre el extremo más lejano que entra en contacto con el metal y la temperatura seteada. La boquilla está fabricada con un material conductor de calor, por lo general metálico que se encuentra recubierto con níquel o cromo para proporcionar una superficie resistente mecánicamente, que con el tiempo y uso se deteriora y la boquilla debe ser reemplazada.

En el mercado se encuentran cautines de distintas formas, en la figura 44.a se aprecia un cautín en forma de lápiz, son livianos y fáciles de manipular, de 12 a 50 [W], generalmente empleados para soldadura manual en electrónica. También existe una pistola soldadora (figura 44.b), dado su nombre debido su forma y gatillo que controla la aplicación de calor, el cual puede ser regulada y capaz de generar más calor que el tipo lápiz. Otro tipo de herramienta para soldar son las estaciones de soldaduras que cuentan con temperatura regulable, a través de un sensor térmico que facilita su uso continuo al mantener constante la temperatura a la cual se desea trabajar durante el proceso de soldadura.

Para realizar un proceso de soldadura en particular, una correcta elección de cabezal soldador o cautín debe hacerse, se recomienda tener en consideración los siguientes factores:

- **Voltaje:** Se debe saber bajo que voltajes opera el cautín, debido a que existen distintos fabricantes en diferentes partes del mundo, en los cuales pueden hacer uso de otro nivel de voltaje con el país de origen.
- **Potencia:** Típicamente los valores van de 15 a 100 [W], suficientes para trabajos con soldadura blanda, sin embargo, una mayor potencia garantiza mayor energía disponible para realizar soldaduras con mayor masa y mantener la temperatura del proceso sin enfriamientos.
- **Control de Temperatura:** Un sensor termostático se encarga de controlar y mantener los niveles de temperatura para lograr la soldadura deseada. Los cautines comunes carecen de esta herramienta.
- **Protección Antiestática:** Algunos elementos electrónicos como los CMOS y los MOSFET son sensibles a cargas estáticas, por lo que es recomendable utilizar cabezales con material disipadores de carga estática o ESD (Electrostatic Discharge Proof)
- **Boquilla:** Vienen en distintos tamaños y formas (figura 45), considerar que el diámetro no debe ser superior al ancho del circuito de cobre en la PCB, se debe hacer una correcta elección para obtener una distribución uniforme entre las piezas que se desean unir.

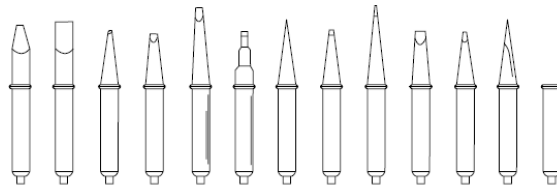


Figura 45. Muestra distintas formas y tamaños de boquilla.

El cabezal y boquilla deben ser mantenidos y examinados cada vez que se terminen de utilizar, eliminando cualquier rastro de óxidos e impurezas, los cuales

pueden ser limpiados con una esponja húmeda o cepillo no abrasivo. Se debe cuidar alcanzar temperaturas demasiado elevadas, ya que durante el proceso de soldadura se puede exceder el límite de temperatura de la boquilla y quedar permanentemente dañada o debilitada al perder sus propiedades.

Para asegurar una buena soldadura todos los elementos involucrados en la unión deben alcanzar una temperatura similar antes de unirse. Por lo general el punto de fusión de la soldadura blanda comercial es de 230 [°C] y la boquilla en su punta alcanza unos 280 a 350 [°C] durante el proceso, por lo que se recomienda trabajar en el intervalo de 200 a 300 [°C] donde se evitan sobre calentamientos o enfriamientos. También una acción prologada de calor puede producir estos efectos no deseados.

3.4.3.5. Proceso de Ensamblaje de Componentes Electrónicos en PCB

Tradicionalmente el ensamblaje de componentes electrónicos solo era manual y se reducía solo a componentes THT, sin embargo, la aparición de microcomponentes más complejos y pequeños impulsó el desarrollo de los componentes SMT, a su vez el avance tecnológico y la demanda de aparatos electrónicos en aumento, incitó a la automatización en la manufactura de las PCBs. Debido a que no todos los elementos poseen una forma determinada de unirse a una PCB, como los descritos en la sección 3.4.2, es que se debe prestar atención a ambas tecnologías.

Una característica en común de ambas tecnologías es que requieren de un espacio donde insertar sus terminales de unión para ser montados, esto puede variar según el tipo de componente a soldar, sin embargo, en general el proceso de ensamblaje sigue los siguientes pasos:

- Selección de componente electrónico, especificaciones y requerimientos.
- Preparación del componente electrónico, cortar y/o doblar sus terminales para la inserción.
- Limpieza de la PCB con algún limpiador comercial o esponja.
- Inspección de las dimensiones de la placa y componente.
- Disponer de todos los elementos para realizar el proceso de soldadura.
- Inserción del componente electrónico en la PCB.
- Soldar las terminales del componente de forma manual o automatizada.
- Remover el exceso de flux, impurezas u óxidos.
- Inspección y testeo.

3.4.3.5.1. Componentes THT

Ensamblaje manual

Para realizar un ensamblaje manual de componentes THT se necesita especial atención a un correcto dimensionamiento del espacio disponible, tamaño de componente electrónico y el largo de sus terminales de unión para que el componente a soldar entre apropiadamente y se lleve a cabo una unión satisfactoria. Se debe preparar correctamente las terminales antes de realizar la soldadura (ver figura 46) para garantizar un soporte estructural para el componente y prevenir su ruptura o daños permanentes, para ello se recomienda considerar lo siguiente:

- Al doblar las terminales del componente, este no debe superar por más de 3 a 5 [mm] al cuerpo del componente.
- El radio de curvatura de las terminales de unión no debe superar el doble de su espesor.
- El componente debe estar centrado y sus terminales deben ser simétricas.
- Doblar el extremo sobresaliente a unos 45° aproximadamente.
- Cortar el exceso de la terminal de unión si es necesario.
- Presionar contra la placa los extremos sobresalientes.
- Soldar componente.

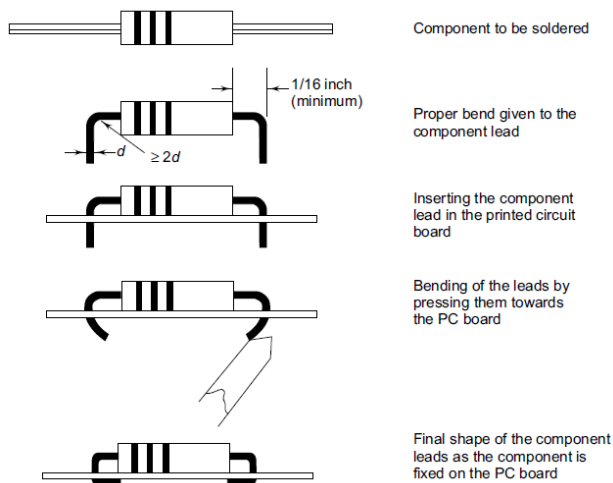


Figura 46. Pasos recomendados para sujetar las terminales a la PCB.

Ensamblaje Automático

La automatización en PCB es usada para fabricar grandes cantidades de placas. La primera versión automatizada para PCB fue diseñada para dispositivos con terminales axiales y se fue expandiendo con el tiempo a la mayoría de los componentes electrónicos descritos en la sección 3.2.4, con lo cual se tuvo que

diseñar maneras eficientes y eficaces para el ensamblaje de los distintos elementos. Para ello se desarrolló una secuencia de inserción de los componentes y una nueva forma de ordenar o disponer de los distintos componentes, como el encintado en rollo de dispositivos y terminales.

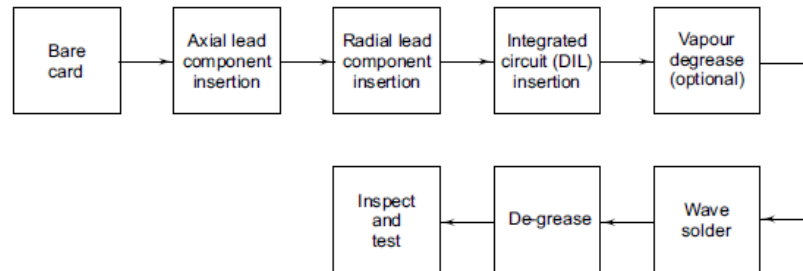


Figura 47. Diagrama de flujo para el sistema de inserción automática y soldadura de componentes con terminales en PCB.

Con la aparición de las máquinas controladas por computadoras CNC, el proceso de inserción de los componentes se hizo con una máquina pantográfica y se desempeñaba para insertar elementos radiales y axiales estandarizados. Este sistema permite insertar simultáneamente a más de una placa los componentes electrónicos requeridos, los cuales son dispuestos y alimentados por una máquina inyectora secuenciadora que se encarga de ordenar correctamente los componentes para su inserción (figura 48), corta y dobla los terminales para luego insertarlos en la placa y dejarlos listos para el proceso de soldadura. Sin embargo, este método presenta ciertas limitaciones en comparación con el proceso manual, como la capacidad de insertar en ángulos distintos a los componentes de diferentes formas y tamaños para poder calzar de mejor manera en la placa, en cambio en el ensamblaje automático se deben manejar tolerancias más estrictas.

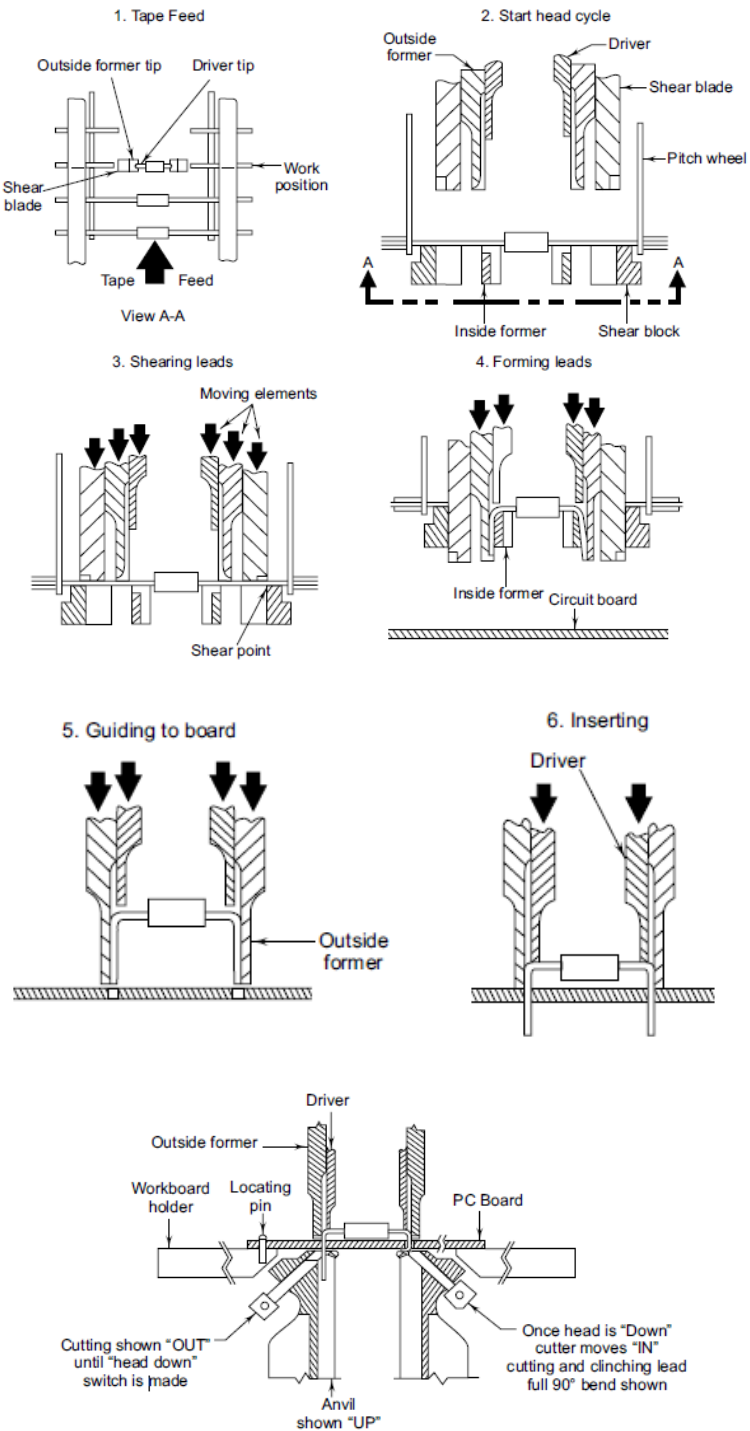


Figura 48. Muestra los pasos descritos esquemáticamente del ensamblaje automático de componente THT.

3.4.3.5.2. Componentes SMT

Ensamblaje Manual

Para insertar componentes electrónicos SMT suele ser relativamente sencillo al contar con una superficie plana, lo cual facilita el agarre por succión a través de una boquilla de vacío tipo lápiz para emplazar los componentes en la placa PCB. Primeramente, la placa debe contar con una pasta de soldadura la cual es aplicada manualmente con una jeringa neumática sobre el circuito electrónico donde se requiere soldar.

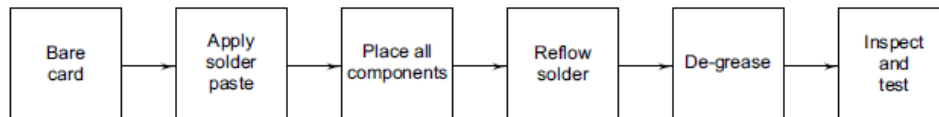


Figura 49. Diagrama de flujo para el sistema de inserción y soldadura manual de componentes SMT en PCB (traducir mapeo).

Una vez emplazado todos los componentes en sus respectivas posiciones, se aplica calor a través de luz infrarroja o hornos de fase vapor, ambos métodos se encargan de fundir la pasta de soldadura uniendo los componentes a la placa. La aplicación de soldadura por puntos es descartada en los componentes SMT debido a que por lo general tienen demasiadas terminales por lo que se requeriría mayor precisión y tiempo.

Ensamblaje Automático

El ensamblaje automático sigue lo mismos pasos que el ensamblaje manual, pero dichos pasos se encuentran automatizados. La ventaja que ofrece el ensamblaje automático de componentes SMT recae principalmente en que sus terminales facilitan su montaje, eliminando los procedimientos de corte y doblado de las terminales de unión, como también la inserción del componente en un agujero.

Los componentes electrónicos para su ensamblaje manual se encuentran dispuestos siendo almacenados y recogido de una caja, ordenados en tubos o como tiras. Cualquiera sea la forma en que se disponen antes de su ensamblaje, una maquina CNC se encarga de recoger y emplazar cada componente con una precisión de al menos 100 [µm] a través de herramientas de vacío y/o pinzas de manera secuencial o simultánea. De manera secuencial la maquina CNC recoge y emplaza cada elemento electrónico por separado, mientras que de manera simultánea recoge y emplaza todos los componentes en una sola operación.

El emplazamiento simultaneo cuenta con muchos cabezales o boquillas que identifican y recogen los distintos componentes que son reconocidos gracias a una

fotografía infrarroja a través de una cámara, dicha fotografía es comparada con el registro de componentes almacenados en la computadora. Una vez recogido el componente la cámara verifica el estado del componente, revisando daños, deformaciones y orientación en la placa. De encontrarse una falla en el componente, la boquilla lo recoge y lo deshecha, provocando la parada de la máquina. Un proceso automatizado para ensamblajes simultáneos ofrece un alto volumen de producción, un bajo costo unitario, pero una alta inversión en instalaciones y tecnología, mientras que un proceso secuencial ofrece una producción de volúmenes más pequeños y una menor inversión en equipos, sin embargo, ambos procesos pueden combinarse para lograr un mejor desempeño acorde a las necesidades del proceso.

3.4.3.6. Limpieza Post Soldadura

La limpieza después del proceso de soldadura es una parte esencial para el buen funcionamiento y confiabilidad de una PCB. Una correcta limpieza puede los siguientes beneficios:

- Reduce la corrosión.
- Previene la pérdida de aislamiento eléctrico entre componentes adyacentes.
- Reduce la suciedad atmosférica que se adhiere a la placa.
- Remueve sustancias biológicas propensas a la formación de hongos.
- Mejora la estética visual de la placa.

Existen principalmente 2 categorías de contaminantes que se presentan en una PCB: Polar (iónico) y No Polar (no iónico). Los contaminantes polares o iónicos son aquellos que se manifiestan en presencia de humedad y tiene relación con la corrosión, las principales fuentes de estos agentes son residuos de la impresión del circuito en la PCB, activadores del flux y sales o sudor que se encuentra en las manos. Por otro lado, los contaminantes no polares o no iónicos provienen de la resina del flux, cremas, aceites, polvo y grasas que se originan debido a la manipulación y ambiente del proceso, como consecuencia se forman superficies aislantes lo que dificulta la circulación de corriente y contacto de los componentes.

3.4.3.6.1. Métodos de limpieza

Para la limpieza regularmente se utilizan solventes que son capaces de disolver ambos tipos de contaminantes y son inertes químicamente con los distintos componentes esenciales de la PCB. Tradicionalmente se utiliza un cepillo para limpiar en PCB con elementos THT, lo cual no es recomendable para PCB con elementos SMT debido a lo estrechamente cerca que se encuentran sus terminales y la dificultad para extraer suciedades de ahí, por lo que en placas con SMT se utilizan aerosoles para limpiar. También en procesos más sofisticados es utilizado el ultrasonido por

arriba de los 40 [kHz] eliminando las partículas adheridas a la placa, pero se debe tener en consideración a aquellos componentes susceptibles a altas frecuencias.

Actualmente en el mercado se utilizan y se encuentran muchos tipos de solventes entre ellos los CFC (Clorofluorocarbonos), cuyo uso ha ido a la baja debido al gran impacto ambiental que generan, sin embargo, se puede contar con los siguientes tipos de solventes para la limpieza:

- **Hidrocarburos Clorados:** Principalmente para eliminar contaminantes no polares, aquí se encuentran el tricloroetileno (C_2HCl_3), tetracloroetileno (C_2Cl_4) y tricloroetano ($C_2H_3Cl_3$).
- **Flúor carbonos:** Poseen baja tensión superficial y son efectivos para remover contaminantes no polares, pero producen graves daños al ozono atmosférico. Aquí se encuentra el Freón 113 ($C_2F_3Cl_3$).
- **Alcoholes:** Son utilizados para remover restos de resina y contaminantes polares, son de bajo costo y de baja toxicidad, su desventaja es que son altamente inflamables. Se pueden mencionar el alcohol etílico (C_2H_5OH) y alcohol isopropílico ($2(CH_3)CH - OH$).
- **Solventes basados en agua:** Su uso ha ido en aumento debido a que son más amigables con el medio ambiente. Su composición consta de agua y algún detergente, el agua remueve contaminantes polares y el detergente los no polares. Aquí se encuentra el agua desionizada.

3.4.3.7. Calidad y control de la unión por soldadura

Las uniones por soldadura deben ser inspeccionadas antes de ser consideradas como buenas, es importante monitorear constantemente el proceso de soldadura con el fin de mantener los parámetros en condiciones óptimas para obtener una buena soldadura.

La inspección visual es la herramienta más fácil y rápida de aplicar a una unión de soldadura. Una soldadura aceptable tiene una superficie suave y brillante, con una forma cóncava libre de orificios, huecos, inclusiones o grietas. Adicionalmente existen otras herramientas y procedimientos para realizar una inspección completa de la unión por soldadura como:

Test de propiedades mecánicas:

- **Ensayo de tracción:** Una probeta estandarizada soldada es sometida a tracción hasta producir su rotura.
- **Micro seccionamiento:** Se mide el espesor de la unión intermolecular y se identifica que este dentro de los parámetros deseados.

Test de funcionamiento eléctrico:

- Testeo de resistencia: A menudo no es muy utilizado debido a la soldadura no presenta una gran diferencia en el valor de la resistencia.
- Test de Joule: Se induce una corriente a un número determinado de uniones de soldaduras dispuestas en serie que se calientan según el valor de su resistencia.
- Rayos X: Es comúnmente utilizado en sistemas automatizados, llamado inspección óptica automatizada Automated Optical Inspection (AOI).

3.4.3.7.1. Fallas comunes

Para tener un mejor conocimiento acerca de los posibles problemas que se pueden presentar tras realizar el proceso de soldadura en PCB y su aceptabilidad dentro de las normas establecidas, es que se comentaran algunos de las fallas más comunes que se pueden dar, sin embargo, en la norma IPC-A-610-C: "Acceptability of Electronic Assemblies" se muestra con más detalles las fallas descritas a continuación:

Desalineamientos o emplazamientos imprecisos

Existen 3 clases de errores que se identifican en el emplazamiento de componentes SMT:

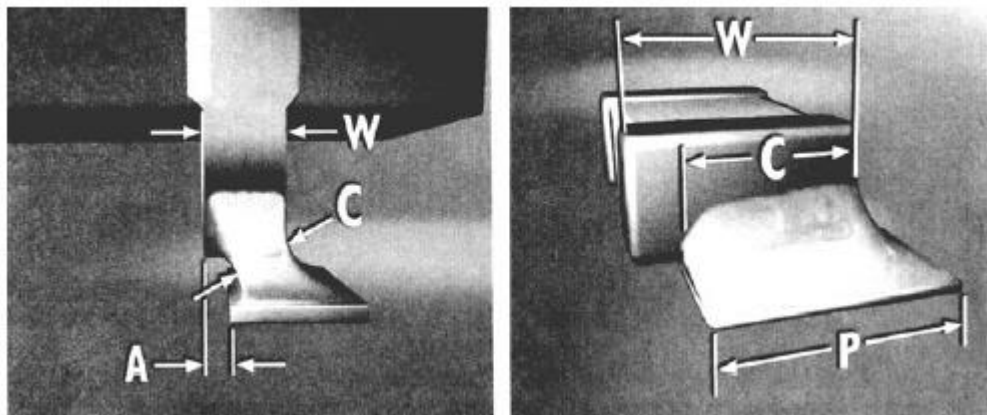


Figura 50. Representa la terminal de unión de un componente SMT y las dimensiones consideradas para el criterio de aceptación.

- Es un defecto de clase 3 si el voladizo A es más largo que el 25% del ancho W de la terminal de unión o el 25% del ancho P del camino del circuito impreso.
- Es un defecto de clase 1 y 2 si el voladizo A es más largo que el 50% del ancho W de la terminal de unión o 50% del ancho P del camino del circuito impreso.

Se debe considerar para que una soldadura sea rechazada, la soldadura debe cubrir al menos el 75% de los terminales de unión de un componente SMT sobre el

camino del circuito eléctrico para evitar error de clase 3 y el 50% para evitar errores clase 1 y 2.

Unión intermolecular débil

Una unión incompleta o débil se produce cuando la soldadura no se funde en su totalidad junto con el material del circuito de la PCB, lo que puede deberse a muchas causas, pero dentro de las más comunes se pueden mencionar:

- Presencia de contaminantes como grasas o aceites en la superficie a soldar, lo cual impide un correcto efecto del flux sobre la superficie.
- Material de soldadura inadecuado o incompatible con el material base.
- Flux incompatible con la superficie a soldar.
- Parámetros inadecuados al proceso como el tiempo y temperatura.

Una unión débil o incompleta es un defecto grave que debe corregirse y parar el proceso para su atención, por lo general si el 5% o más del total de los puntos de soldadura están defectuosos es rechazada.

Unión Intermolecular Rugosa

Este efecto se da cuando la soldadura se funde por completo junto con el camino del circuito de la PBC y por causa de falta de adherencia se forma una superficie irregular que puede ser muy delgada o gruesa en ciertos puntos de la unión. Esto ocurre debido a que parte del material base se desprende después del fundido inicial lo que provoca una gota irregular, sus causas pueden ser la presencia de contaminantes incrustados en la superficie o impurezas en el material de soldadura.

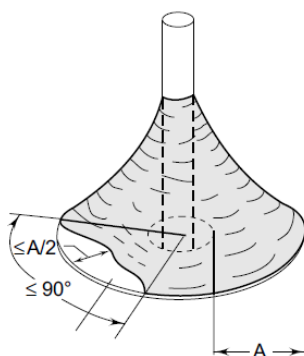


Figura 51. Esquema de unión THT y dimensiones consideradas para el criterio de aceptación.

La rugosidad es aceptable solo si al menos el 75% del camino del circuito en la PCB se encuentra cubierto por la soldadura y el ángulo entre la soldadura y la parte

más delgada es menos que el 90% del 75% de la circunferencia del punto de soldadura.

Unión puente

Este tipo de uniones se da cuando un exceso de soldadura es depositado sobre el circuito de la placa y se produce un contacto eléctrico no deseado entre caminos de la placa (b), entre terminales de componentes electrónicos (a) o entre el camino y un terminal de un componente electrónico (c). Este tipo de defectos es el menos aceptable debido a que una mala distribución de la corriente dentro del circuito puede provocar fallas catastróficas en la placa y en los elementos electrónicos.

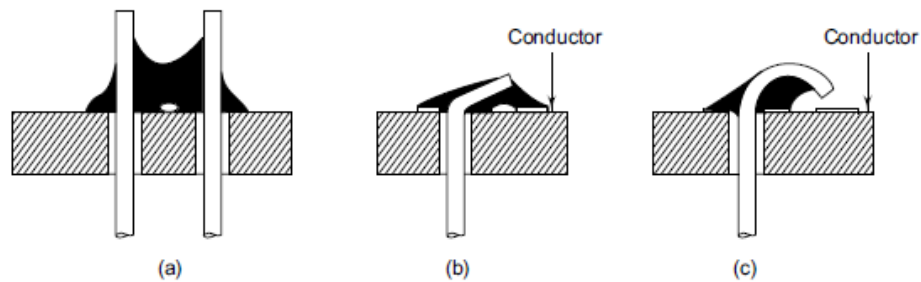


Figura 52. Conexión por puentes no deseadas en el proceso de soldadura.

Delaminación y ampollamiento

Estos efectos se dan a causa de una exposición excesiva al calor que puede combinarse con humedad atrapada entre las superficies.

- **Delaminación:** Se produce una separación entre las capas adyacentes al punto de soldadura, puede darse en las capas del material base, en los bordes de la placa o en los agujeros. Este defecto no es aceptable.
- **Ampollamiento:** Se manifiesta como una protuberancia o hinchazón en el punto de soldadura y suele producirse debido a la acumulación de partículas gaseosas. Este defecto es solo aceptado si el defecto se encuentra alejado del agujero de unión o no producen algún tipo de unión puente.

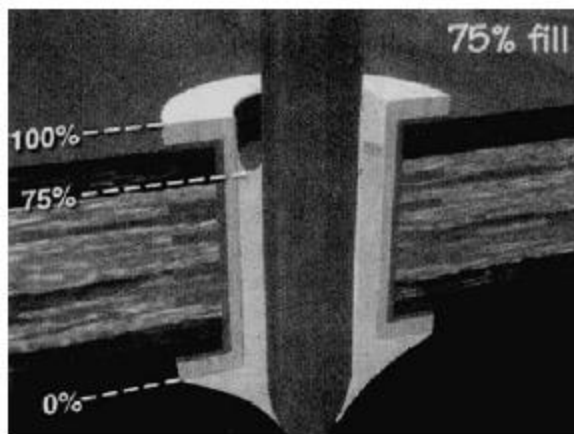


Figura 53. Relleno aceptable para una componente y PCB con THT.

Para placas y componentes THT es importante asegurarse de que el agujero cuente con flux en toda su superficie y se rellene a un mínimo del 75% del agujero.

Desgasificación y agujeros

Este defecto se manifiesta como una pequeña y esférica cavidad en el punto de soldadura. Esto ocurre principalmente cuando la humedad o materiales del flux quedan atrapado en la unión y son vaporizados debido al calor del soldador, que tratan de escapar hacia la superficie debido a la presión. Esto puede prevenirse precalentando las superficies para eliminar restos de humedad o flux.

Otras causas menos comunes que provocan este defecto son:

- El agujero de la placa es demasiado grande comparado con el diámetro de la terminal de unión del componente.
- Inserción incorrecta del componente.
- Residuos orgánicos como tintas.
- Humedad excesiva del ambiente en el proceso de soldadura.
- Excesiva aplicación de flux.

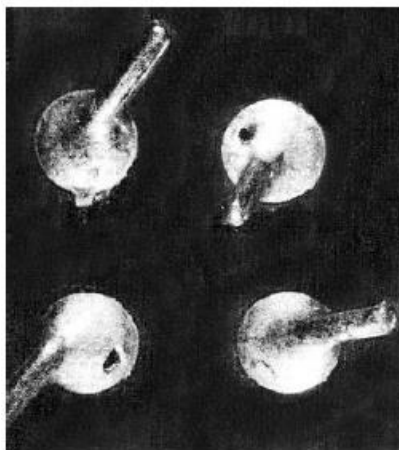


Figura 54. Muestra la manifestación típica del defecto por desgasificación.

Fuente figuras 18 a 54: R. S. Khandpur, (2005), Printed Circuit Boards: Design, Fabrication, Assembly and Testing. Tata McGraw-Hill Education: New York, DOI: 10.1036/0071464204.

3.4.3.7.2. Normas de calidad

El instituto de Interconnecting and Packing Electronic Circuits (IPC) se ha encargado de elaborar una serie de documentos que tratan sobre el ensamblaje y fallas que se dan durante el proceso de soldadura, los tipos de materiales a ocupar y sus características, complementos y desempeño. La información expuesta en esta sección puede ser leída y observada con mayor detalle en las siguientes normas establecidas:

- **IPC-AC-62A: “Aqueous Post-solder Cleaning Handbook”:** Presenta un manual todo lo relacionado con la limpieza con soluciones acuosas como las propiedades y reacciones de los químicos, equipamiento y procesos de limpieza, seguridad y consideraciones medioambientales.
- **IPC-DRM-40E: “Through-hole Solder Joint Evaluation Desk Reference Manual”:** Presenta una manual con gráficos en 3D acerca de los defectos de la unión y su manifestación según el ángulo de contacto, unión intermolecular, deposición vertical, etc.
- **IPC-TA-722: “Technology Assessment Handbook on Soldering”:** Contiene 45 artículos que cubren todos los aspectos generales de la soldadura como materiales para soldadura, manual de soldadura, automatizada y producción en masa.
- **IPC/EIA J-STD-004: “Requirements for Soldering Fluxes-Includes Amendment 1”:** Contiene los requerimientos para la clasificación y calificación de las resinas, fluxes orgánicos e inorgánicos y lista de materiales aditivos para los fluxes.

-
- **IPC-AJ-820: “Assembly and Joining Handbook”:** Contiene descripciones de técnicas para soldar y ensamblar, términos y definiciones, diseños de PCB, tipos de terminales y componentes y limpieza.
 - **IPC/EIA/JEDEC J-STD-003A: “Solderability Test for Printed Boards”:** Contiene información teórica y explicativa acerca de las distintas pruebas para medir diferentes propiedades de la placa.
 - **IPC-M- 108: “Cleaning Guides and Handbooks Manual”:** Contiene consejos para la limpieza y manuales técnicos sobre cómo solucionar problemas durante la limpieza.
 - **IPC-CH-65-A: “Guidelines for Cleaning of Printed Boards and Assemblies”:** Incluye descripciones y discusiones acerca de los métodos de limpieza y los problemas asociados, relación entre los materiales, los procesos de fabricación, ensamblado y sus contaminantes.
 - **IPC-SC-60-A: “Post-solder Solvent Cleaning Handbook”:** Manual acerca del uso de solventes en el proceso de limpieza manual y automatizado, propiedades de los solventes y residuos.
 - **IPC-DRM-53: “Introduction to Electronics Assembly Desk Reference Manual”:** Contiene fotografías y dibujos gráficos que ilustran las tecnologías de ensamblaje THT y SMT.
 - **IPC-M-104: “Standards for Printed Board Assembly Manual”:** Contiene los 10 documentos más usados para el ensamblaje de las PCB.
 - **IPC-CM-770D: “Component Mounting Guidelines for Printed Boards”:** Contiene guías para la preparación de los componentes para el ensamblado en las PCB, contiene técnicas de ensamblaje manual y automatizado.
 - **IPC-PE-740A: “Troubleshooting for Printed Board Manufacture and Assembly”:** Contiene información histórica de los problemas y correcciones más comunes en el diseño, manufactura, ensamblaje y testeo de las PCB.

3.4.3.7.3. Salud y seguridad

Durante el proceso de soldadura blando es posible visualizar dos grandes accidentes que se dan con frecuencia: choques eléctricos y quemaduras.

- Se debe tener precaución en la manipulación de los materiales utilizados para la soldadura debido a que algunos pueden contener plomo, por lo que se recomienda no ingerir de ninguna forma y lavarse correctamente las manos después de su manipulación.
- Los vapores emitidos durante el proceso de soldadura no contienen plomo, a menos que el proceso de soldadura se lleve a cabo a bajas temperaturas, se recomienda realizar el proceso en un lugar ventilado o que cuente con extractor de aire.

-
- Una vez utilizado el cabezal soldador o cautín se recomienda no tener contacto directo con la piel, ya que al terminar el proceso se encuentra a altas temperaturas y demora un tiempo en enfriar. El cabezal soldador y material fundido puede dañar gravemente la piel.
 - Se recomienda siempre hacer limpieza del lugar de trabajo con un paño o cepillo para evitar cortes con residuos metálicos y el uso de esponja para limpiar los cabezales.
 - En caso de experimentar una quemadura se recomienda enfriar la zona afectada dejando el agua correr sobre la quemadura durante 10 a 15 [min]. No humectar con cremas o lociones, procure recibir atención médica.
 - El contacto con los componentes electrónicos debe ser siempre por su parte menos conductiva, por lo general, se debe evitar el contacto con las terminales de unión, la cual es la parte más conductiva del componente.
 - Solo tocar las PCB por los bordes evitando el contacto directo con las manos sobre las partes conductoras de la placa.

3.4.3.7.4. Re-manufacturación y reparación de PCBs

Cuando una PCB es detectada con algún defecto, ya sea solo la placa o con componentes ensamblados, se debe evaluar el costo económico que traerá la reparación o re-manufacturación de la parte defectuosa y de forma paralela ver cómo otorgarle las mismas propiedades que una en perfecto estado.

Por lo general, cuando se detecta defectos en la placa es convenientes desechar por completo la placa y fabricar una nueva, debido al bajo costo de producción que tiene y la poca confiabilidad que ofrece intervenir de manera manual o automatizada problemas demasiado específicos. Sin embargo, en casos comunes como la falla de un componente es permisible la reparación cuidando que cumpla con los requerimientos de diseño y confiabilidad.

Para la reparación de algún componente defectuoso se recomienda seguir los siguientes pasos:

- Evitar retirar componentes en buen estado, debido a que se pueden dañar y quedar mal emplazados luego.
- No utilizar temperaturas altas para desoldar los componentes, daña componentes adyacentes y placa.
- No utilizar herramientas metálicas para la remoción de material y componentes, es posible dañar componentes adyacentes y placa.
- Observar con cuidado la posición y orientación del componente dañado para ser reemplazado.
- Manipular placas por los bordes, debido a que la grasa y transpiración de las manos ensucia las terminales y conexiones eléctricas.

-
- Para retirar el componente se debe calentar y extraer la soldadura, doblar las terminales para liberar el componente de la placa y con cuidado retirarlo de la placa.
 - Luego de retirar componente, utilizar algún limpiador para asegurar superficies libres de impurezas, un algodón es útil.
 - Al montar el nuevo componente se debe asegurar una entrada suave sin forzar a que entren las terminales de unión a la placa.
 - Al soldar el componente procurar contar con la herramientas y materiales necesarios.
 - La unión es posible testearla rápidamente midiendo con un multímetro el valor de la resistencia entre los terminales del componente y la unión, una diferencia significativa representa fallas en la unión.

3.4.4. PCBs y medio ambiente en Chile

La inminente escasez de los recursos naturales a nivel global es una consecuencia directa del uso ineficiente de los mismos, debido al actual flujo de materia lineal que tienen los productos al ser producidos, consumidos y finalmente desechados. Por lo cual se requieren de una serie de intervenciones a la actual cadena de consumo para eliminar gran parte de los desperdicios que se generan y minimizar las pérdidas de materia y energía a través de acciones como el reciclaje, reparación, reutilización, remanufacturación, restauración y rediseño de los productos. Este nuevo hábito de producción y consumo traerá consigo nuevos modelos de negocios circulares y con ello se presenta la oportunidad de aumentar los beneficios económicos al generar valor a partir de la recuperación de recursos, rediseño de productos y uso de energías renovables.

Actualmente en Chile se estima que se recicla solo el 10% del total de residuos, haciéndola una práctica relativamente nueva, sin embargo, ha adquirido mayor énfasis en el mundo privado desde la publicación de la Ley n°20.920 (Responsabilidad Extendida del Productor) en el año 2016. De un total de 325.334 empresas se identifican alrededor de 282 actores vinculados a este tipo de prácticas, de los cuales se estima que 59% son privadas y un 45% perteneciente a ese universo corresponde a la categoría de pymes.

Una buena iniciativa puede ser la recuperación de miles de artefactos electrónicos desechados y poder extraer todo el metal que se encuentran dentro de las PCB. A largo plazo, las pymes manufactureras como productoras también de materia prima deberán generar una alta capacidad de respuesta, ya que posiblemente la única forma de obtener los recursos necesarios para elaborar nuevos productos, debido a la escasez de recursos naturales, sea a través del material que se encuentra en los productos electrónicos desechados.

3.5. Tecnologías de Control Numérico

El control numérico (CN) corresponde a una forma de automatización en la cual un programa o software se encarga de interpretar datos alfanuméricos secuenciales que representan movimientos relativos y acciones de herramienta, pudiendo controlar de manera remota la máquina. Los movimientos relativos se realizan respecto a un cabezal de trabajo o herramienta y una pieza de trabajo el cual es procesada en la máquina. Los primeros avances en el control de máquinas con estas tecnologías se les atribuye a John Parsons y Frank Stulen quienes a finales de los años 40's dieron los indicios para que en 1952 el MIT demostrara el funcionamiento por control numérico de una fresadora de tres ejes.

3.5.1. Componentes de un Sistema de Control Numérico

Para un buen funcionamiento un sistema CN debe contar con 3 elementos básicos:

- **Programa de pieza:** Corresponde al conjunto de comandos o códigos que serán ejecutados por el equipo de procesamiento. Estos datos alfanuméricos contienen información respecto a la posición del cabezal dadas en los ejes X-Y-Z y acciones adicionales como velocidad de rotación, velocidad de alimentación y cambios de herramienta, etc. En un comienzo los comandos eran codificados en cintas de papel perforadas.
- **Unidad de control de maquina (MCU):** Corresponde al microcontrolador que se encarga de almacenar un programa, editar y ejecutar una serie de funciones de manera secuencial. Está constituida por un hardware y software. El hardware corresponde a la parte física que se encarga de contener y procesar la información a través de un CI. Mientras que el software proporciona un interfaz, algoritmos de cálculo y un convertidor que se encarga de transformar el programa de pieza a un formato legible para la MCU, esto con el fin de controlar el sistema y comandar la máquina. En los comienzos de la tecnología de CN el programa de pieza y códigos eran cargados a la MCU a través de un lector de cintas perforadas, las cuales en la actualidad han sido reemplazada por dispositivos USB, ofreciendo menor espacio físico y mayor capacidad de almacenamiento de datos. Debido a que la MCU tiene características computacionales es que se le denomina CNC (Control Numérico por Computadora) para diferenciarlo de las primeras tecnologías de CN.
- **Equipo de procesamiento:** Corresponde a todo elemento físico que se encarga de ejecutar las acciones para transformar una pieza inicial de trabajo en una pieza terminada. Estas acciones son controladas por la MCU que procesa los comandos entregados de acuerdo con el conjunto de instrucciones que contiene el programa de piezas.

3.5.2. Sistema de coordenadas en CN

El sistema de coordenadas que se utiliza especificar las posiciones en el control numérico corresponde a un sistema de ejes de coordenadas estándar que sigue la regla de la mano derecha. El sistema está compuesto por tres ejes lineales (X, Y, Z) y tres ejes rotatorios (a, b, c). El uso de los ejes rotatorios es utilizado por máquinas CNC de mayor tecnología para elaborar piezas que requieren mayor precisión y formas más complejas. Mientras que máquinas más sencillas como impresoras de tintas de cartucho o laminadoras solo requieren dos ejes para definir su posición.

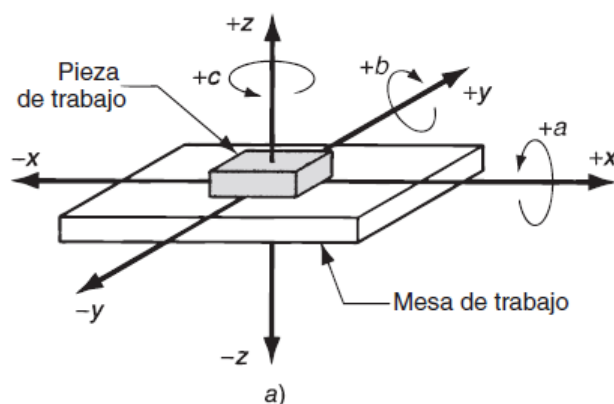


Figura 55. Sistema de coordenadas standard utilizados en el control numérico.

Para generar cualquier movimiento en una máquina CN es necesario saber y comunicar a la MCU el espacio físico por donde puede desplazarse la herramienta de trabajo. Para esto es que se ha convenido un sistema de ejes de coordenados, estandarizado por la International Organization for Standardization en la ISO841:2001 *“Industrial automation systems and integration — Numerical control of machines — Coordinate system and motion nomenclature”* donde describe una serie de recomendaciones para una correcta definición de los planos y ejes de movimiento en una máquina CN, con lo cual se pretende lograr un mejor entendimiento entre fabricantes de máquinas CN.

3.5.3. Control de movimiento en CN

Una vez definido el espacio por donde se puede desplazar la máquina, se define como se moverá. Esto se hace en base a una posición relativa entre una pieza de trabajo y el cabezal o herramienta de trabajo. El control del movimiento se da alrededor de un punto u objeto que se toma como referencia y que se encuentra de manera estática, por lo general es la pieza de trabajo la que se ajusta a una mesa de trabajo y se opera sobre ella.

Para el control de movimiento basados en CN los sistemas operan según su trayectoria y posicionamiento dentro del sistema de coordenadas.

3.5.3.1. Sistemas de control de movimiento según su trayectoria

Dentro del sistema de coordenadas los ejes, cabezal y pieza de trabajo se definen siguiendo dos tipos de lógicas:

- **Trayectoria de punto a punto:** Se mueve hacia una posición programada, sin considerar la trayectoria de todos los elementos que se mueven para llegar a esa posición. El sistema solo reconoce las posiciones relativas inicial y final del cabezal y pieza de trabajo, mientras que desconoce las posiciones y distancias relativas entre los ejes. Los movimientos se ejecutan de a uno a la vez.
- **Trayectoria continua:** Proporciona un conocimiento total y en tiempo real de las posiciones, cada eje, cabezal y pieza de trabajo. Es utilizado en máquinas de mayor tecnología y donde se requieren ejecutar tareas complejas y de manera simultánea, por lo general poseen más de 3 ejes.

3.5.3.2. Sistemas de control de movimiento según su posicionamiento

Dentro del sistema de coordenadas las posiciones se definen según dos lógicas:

- **Posicionamiento Absoluto:** Todas las posiciones tienen como coordenada de referencia un punto de origen inicial (0,0,0). Al definir un nuevo movimiento se debe tener en cuenta la posición del origen y la última posición relativa entre el cabezal y pieza de trabajo dentro del sistema de coordenadas.
- **Posicionamiento Incremental:** Todas las posiciones dentro del dominio tienen como coordenada de referencia el punto anterior. Al definirse un nuevo movimiento se debe tener en cuenta solo la última posición relativa entre el cabezal y pieza de trabajo, ya que dicho punto corresponde al punto de origen (0,0,0) para el próximo movimiento.

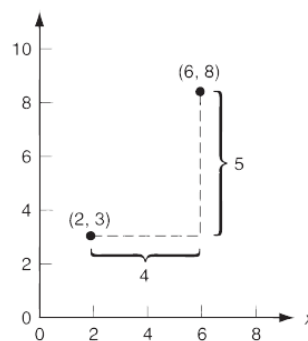


Figura 56. Representación del sistema de coordenadas según su posicionamiento absoluto (puntos {2,3} y {6,8} con origen {0,0}) e incremental (trayectorias {4} y {5}).

3.5.4. Análisis del sistema de posicionamiento en CN

Para entender como una maquina CNC logra moverse durante una operación, es necesario comprender como el sistema del CN es capaz de convertir las coordenadas comandadas en el programa de piezas en posiciones relativas entre el cabezal y la pieza de trabajo.

El sistema de posicionamiento está compuesto por una serie de elementos mecánicos físicos que se encargan de ejecutar los movimientos según la información especificada en el programa de pieza. Los sistemas de posicionamiento simple se componen de una mesa de trabajo la cual se mueve con la pieza de trabajo sujeta estáticamente a la mesa, su propósito es moverse linealmente y de manera relativa a un cabezal o herramienta. Para generar el movimiento lineal es utilizado un tornillo sin fin (eje motriz), que se encuentra acoplado a un motor paso a paso (servomotor). El movimiento rotatorio otorgado por el servomotor es transformado a movimiento lineal gracias a una rosca guía que se encuentra sujeta estáticamente a la mesa de trabajo, y por donde está inserto el tornillo sin fin. El tornillo sin fin cuenta con cierto paso p (mm/rosca o mm/rev), lo cual junto con la velocidad de giro (rpm) del tornillo sin fin determinan la distancia lineal que se mueve la mesa y la velocidad de avance de la mesa.

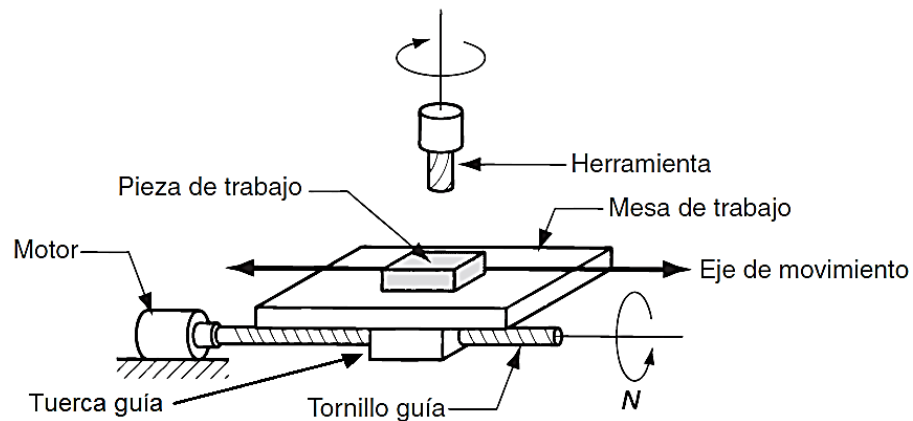


Figura 57. Muestra el arreglo simple de un sistema de posicionamiento.

En los sistemas de CN para controlar los movimientos generados a partir del sistema de posicionamiento se utilizan dos tipos básicos de control de movimientos: ciclo abierto y ciclo cerrado. Los sistemas de ciclo cerrado cuentan con sistema de verificación, el cual mide en tiempo real la posición de la mesa de trabajo comparándola con la especificada en el programa de pieza, compensando automáticamente cualquier diferencia. Este tipo de sistema de control tiene un mayor costo y es utilizado principalmente en procesos de

trayectoria continua o que impliquen vibraciones y fuerzas elevadas de mecanizado. En cambio, los sistemas de ciclo abierto son menos costosos y no verifican la posición de la mesa, por lo cual son convenientes donde las fuerzas de resistencia al movimiento son mínimas. Debido al enfoque de este trabajo es que se profundizará el sistema de ciclo abierto, ya que la deposición de material no implica grandes fuerzas de resistencia de movimiento.

3.5.4.1. Sistemas de Posicionamiento de Ciclo Abierto

En los sistemas CN por lo general, los encargados de ejecutar el movimiento corresponden a motores eléctricos de engranes, servomotores o motores de paso. Estos motores son controlados por pulsos eléctricos enviados por la MCU. Cada pulso eléctrico se convierte en un giro de fracción de una revolución en el motor, lo cual se denomina ángulo de paso α . Esto se traduce en que cada pulso emitido por la MCU el motor gira cierta cantidad de grados, cumpliendo la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{n_s} \quad (3)$$

Donde α corresponde al ángulo de paso en grados por pulso [grados/pulsos], n_s corresponde a la cantidad de ángulos de paso para el motor que debe ser un número entero [1,2,3,...,n]. En consecuencia, el ángulo de rotación descrito por el eje motriz o eje guía y sistema de posición viene dada por:

$$A = \alpha n_p \quad (4)$$

Donde A corresponde al ángulo de rotación del eje motriz en grados, α corresponde al ángulo de paso en grados por pulsos [grados/pulsos] y n_p a la cantidad de pulsos eléctricos que recibe el motor. Esta ecuación y las siguientes deben adaptarse para el caso de que la relación de los engranajes sea diferente a una relación 1:1.

El movimiento resultante de la mesa de trabajo como consecuencia de la rotación del tornillo guía o eje motriz se determina mediante:

$$x = \frac{pA}{360^\circ} \quad (5)$$

Donde x es la posición del eje en relación con la posición inicial en milímetros [mm], p corresponde al paso del tornillo guía en milímetros por revolución [mm/rev], $A/360^\circ$ es la cantidad de revoluciones totales o revoluciones parciales del tornillo guía. Ahora bien, si se combinan las dos ecuaciones anteriores, se puede definir la cantidad de pulsos requeridos para un desplazamiento especificado en la posición x en un sistema punto a punto como:

$$n_p = \frac{360^\circ x}{p\alpha} \quad (6)$$

Los pulsos eléctricos emitidos tienen cierta frecuencia, por lo cual es posible determinar la velocidad del tornillo guía, sabiendo la frecuencia del tren de pulsos:

$$N = \frac{60f_p}{n_s} \quad (7)$$

Donde N es la velocidad de rotación en revoluciones por minuto [rev/min], f_p corresponde a la frecuencia del tren de pulsos en Hertz [Hz] y n_s es la cantidad de pulsos por revolución [pulso/rev].

Se define la velocidad de viaje de la mesa de trabajo para un sistema de posicionamiento en dirección del eje del tornillo guía según la ecuación:

$$v_t = Np \quad (8)$$

Donde v_t corresponde a la velocidad de viaje de la mesa en milímetros por minuto [mm/min], N es la velocidad de rotación de del motor en revoluciones por minuto [rev/min] y p corresponde al paso del tornillo guía en milímetros por revolución [mm/rev].

Finalmente, uniendo las dos ecuaciones anteriores se puede obtener la frecuencia requerida por el tren de pulsos para controlar la mesa de trabajo a cierta velocidad especificada:

$$f_p = \frac{v_t n_s}{60p} \quad (9)$$

3.5.5. Precisión en el posicionamiento del cabezal

Los sistemas de CN se caracterizan por tener una alta precisión en tareas repetitivas en prolongadas horas de trabajo, para evitar detenciones es necesario asegurar un buen funcionamiento durante la operación teniendo en cuenta 3 indicadores críticos para el sistema de posicionamiento: La resolución de control, la exactitud y la capacidad de repetición (repetibilidad). Estos indicadores tienen relación directa con los sistemas electrónicos y mecánicos de la máquina CNC.

3.5.5.1. Resolución de control

Se refiere a la capacidad del sistema para dividir y distinguir puntos dentro del rango total de movimiento del eje. Estos puntos se encuentran igualmente separados entre sí a lo largo del eje, se busca que la distancia entre los puntos sea la menor posible y con ello lograr una mayor resolución de control. La cantidad de puntos está limitada por factores del sistema electromecánico y la cantidad de bits con la cual trabaja la unidad de control para definir la posición en el eje.

Los factores electromecánicos que influyen en los sistemas de ciclo abierto son: paso del tornillo guía, relación engranes motor y ángulo de paso del motor. Estas características de los elementos electromecánicos determinan la resolución de control, es decir, la distancia mínima de desplazamiento de la mesa de trabajo para cada eje y viene dada por la siguiente ecuación:

$$CR_1 = \frac{p}{n_s} \quad (10)$$

Donde CR_1 es la resolución de control de los componentes electromecánicos en milímetros [mm], p es el paso del tornillo guía en milímetros por revolución [mm/rev] y n_s corresponde a la cantidad de pasos por revolución [pasos/rev].

Por otro lado, la limitante de cantidad de bits que definen el valor de coordenadas del eje viene dada principalmente por la capacidad de almacenamiento de la unidad de control. Si B es el número de bits en el registro de almacenamiento para cada eje, el número de puntos equidistantes capaz de generar la unidad de control en el eje viene dada por : 2^B . Suponiendo que los puntos de control están separados por distancias iguales, entonces:

$$CR_2 = \frac{L}{2^B - 1} \quad (11)$$

Donde CR_2 corresponde a la resolución de control de la unidad de control MCU en milímetros [mm], L es el largo del eje en milímetros [mm]. Por lo tanto, la resolución de control del sistema de posicionamiento viene dado por el máximo valor entre ambas resoluciones de control, es decir:

$$CR = \text{Max} \{CR_1, CR_2\} \quad (12)$$

En general, se da que CR_2 es menor que CR_1 , debido a que actualmente la tecnología ofrece dispositivos capaces de almacenar una gran cantidad de información, por lo que la limitante frecuentemente viene dada por los elementos del sistema electromecánico de la maquina CNC.

Al ejecutarse un movimiento en el sistema de posicionamiento para alcanzar un punto de control determinado, la capacidad para llegar a tal punto estará condicionada por errores mecánicos, estos vienen dados por imperfecciones o imprecisiones en los elementos del sistema mecánico como: la holgura entre el tornillo guía y la mesa de trabajo, retroceso en los engranes de motor o desviaciones en los ajustes del ensamblaje. Estos errores pueden ser representados estadísticamente, suponiendo que forman una distribución alrededor de un punto de control dado, determinada por una distribución normal con media $\mu=0$. Además, si se considera la desviación estándar de la distribución constante en todos los puntos de control en el rango de cada eje, gran parte de los

errores mecánicos (97,74%) estarán contenidos dentro del ± 3 desviaciones estándar del punto de control.

Conocido las definiciones de resolución de control y distribución de los errores mecánicos, ahora se considerará la exactitud y repetibilidad.

3.5.5.2. Exactitud

La exactitud se refiere a la capacidad de la máquina de posicionarse sobre el punto de control programado. Esto se traduce al peor de los escenarios, en el cual el punto alcanzado se encuentra exactamente entre dos puntos de control adyacentes. Como el sistema solo reconoce esos puntos como posibles puntos de control tenderá a posicionarse en uno de los dos, con lo cual habrá un error en la posición final deseada. La exactitud se entiende como es el máximo error posible que puede darse entre el punto de control deseado y la posición real final alcanzada por el sistema, es posible expresarlo matemáticamente como:

$$\text{Exactitud} = 0,5CR + 3\sigma \quad (13)$$

Donde CR es la resolución de control del sistema en milímetros [mm] y σ corresponde a la desviación estándar de la distribución de error en milímetros [mm].

3.5.5.3. Capacidad de repetición (Repetibilidad)

La repetibilidad se entiende como la capacidad que posee un sistema de posicionamiento para volver a un punto de control determinado programado anteriormente, esto se mide en términos de los errores de posición observados cuando el sistema de posicionamiento se coloca sobre un punto de control. Es decir, la repetibilidad de cualquier eje del sistema de posicionamiento se define como el rango de errores mecánicos asociados con el eje; se expresa como:

$$\text{Repetibilidad} = \pm 3\sigma \quad (14)$$

Donde σ corresponde a la desviación estándar de la distribución de error en milímetros [mm].

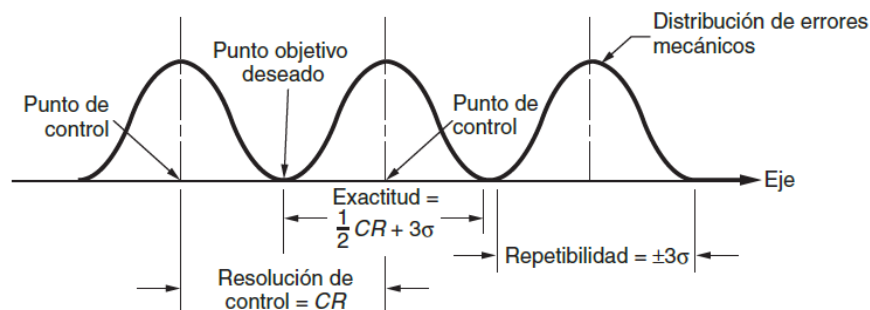


Figura 58. Muestra parte del rango del eje del sistema de posicionamiento con tres puntos de control, donde se observa la resolución de control, exactitud y repetibilidad.

Fuente figuras 55 a 58: Groover, M. P. (2007). Fundamentos de Manufactura Moderna Materiales, Procesos y Sistemas (3a. ed.). Mcgraw-hill Interamericana: Guadalajara, México.

3.5.5.4. Backlash

El backlash o desplazamiento es un efecto que se da en el sistema de posicionamiento entre el tornillo motriz y la tuerca motriz solidaria a la mesa del eje. Este fenómeno se produce debido a una cavidad o holgura existente entre ambos elementos mecánicos y se manifiesta cuando, durante la operación sobre un mismo eje se comanda cambiar el sentido de movimiento de la mesa, y por ende también el sentido de giro del tornillo motriz. Dado que el movimiento rotario del eje es transformado en movimiento lineal en la dirección del eje es que se genera un desfase adicional progresivo cada vez que el movimiento de la mesa en el eje cambia de sentido. Cuando se comanda el cambio de sentido, hay un instante breve donde el tornillo motriz puede girar en vacío antes de que el movimiento se transmita y la mesa comience a moverse como se ve en la figura 59. La principal consecuencia del backlash es una imprecisión en el posicionamiento del cabezal y con ello puntos de soldadura donde no son deseados.

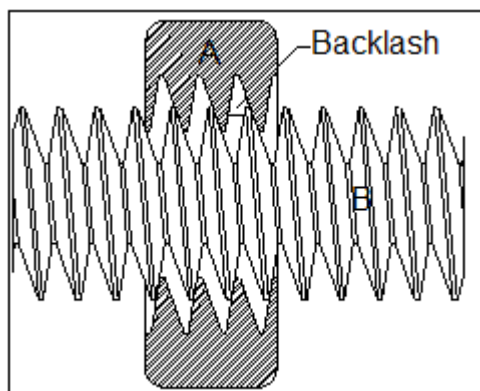


Figura 59. Muestra el efecto de desplazamiento o backlash que se produce entre la unión mecánica de la tuerca motriz A y el tornillo motriz B.

Fuente: Extraído de internet desde
https://www.machinetoolhelp.com/Repairing/What_is_backlash.html

3.5.6. Programación de pieza por CN

La etapa de programación de pieza consiste en planificar y documentar la secuencia de movimientos que realizará la maquina durante la operación. Se definen los puntos, líneas,

superficies y geometrías que se desean en la pieza de trabajo, como también los tipos de cabezal y velocidades de movimiento. Tener en consideración que se requiere de alguien capacitado para realizar esta tarea, debe manejar ciertos conocimientos previos acerca de materiales y soldadura como también sobre programación en CN.

Todo lenguaje utilizado en la programación en CN usa un sistema de códigos basados en números binarios. El sistema binario es el lenguaje más primitivo capaz de ser entendido por una MCU, desde las máquinas de baja gama tecnológica hasta las máquinas más modernas utilizan un sistema de codificación en base a un sistema binario. El primer sistema de codificación llamado BCD (Binary-Coded Decimal) fue desarrollado por la EIA (Electronics Industry Association) y la ISO (International Standards Organization) debido a la dificultad para representar fracciones y ciertos números en el sistema decimal en máquinas CN. Las primeras aplicaciones eran de tipo Tape Format, ya que se desarrollaron para ser utilizadas cuando las cintas perforadas lideraban en la programación en CN y el sistema binario de unos y ceros era representado por un agujero o su ausencia. Luego con el avance tecnológico se fueron desarrollando nuevas codificaciones llamadas Block Format donde se incluyen caracteres alfanuméricos que se agrupan según sus funciones y características dentro de la programación en CN. Actualmente el Block Format es utilizado por la mayoría de controladores de CN siendo el lenguaje RS274/NGC el más ampliamente aceptado.

La programación puede ser llevada a cabo tanto con métodos manuales como automatizados. Dentro de las técnicas destacadas se encuentran la programación manual de piezas, el ingreso manual de datos, la programación de piezas asistidos por computadora y la programación de pieza asistida por CAD/CAM.

3.5.6.1. Programación Manual de Pieza

Este tipo de programación es utilizada en CN para operaciones simples, repetitivas y de baja complejidad, donde el operador de la máquina ingresa directamente los datos requeridos en el tablero de la máquina o PC equipado con el software controlador de la máquina CN y lo ejecuta. Principalmente se emplean en máquinas CN de 2 ejes o menos, como en tareas de rectificado, laminado y taladrado.

3.5.6.2. Ingreso Manual de Datos (MDI)

El MDI (Manual Data Input) es un método similar a la programación manual, ya que el operador de la máquina CN ingresa directamente todos los datos de geometría y movimientos en la máquina CN, pero antes de ejecutar cualquier operación. Esta vez el operador cuenta con una pantalla y panel de control alfa numérico en la máquina que le permite visualizar el código de programación, trayectorias del cabezal y una simulación del trabajo en tiempo real. El operador no necesariamente debe ser quien programa o tener un alto conocimientos de programación, ya que el panel de control interactúa con el operador a través de un menú asistido que hace indicaciones y preguntas relativas al programa a ejecutar a las cuales debe responder. Estas secuencias de preguntas e

indicaciones están diseñadas para que el operador ingrese los datos de manera consistente, ordenada y lógica. El operador requiere un entrenamiento mínimo, debe ser capaz de leer un plano de pieza y estar familiarizado con el proceso de manufactura donde se emplea el CN, es por ello que este método es utilizado en procesos o empresas pequeñas que requieren poca inversión, permitiendo un acercamiento previo a las tecnologías CN tanto a los procesos como al personal.

3.5.6.3. Programación asistida por computadora

Este modelo de programación utiliza uno de los primeros lenguajes desarrollados para CN llamado APT (Automatic Programing Tool). Este lenguaje es utilizado para tareas más complejas, donde los movimientos requieren ser ejecutados en una secuencia determinada en base a una serie de puntos, líneas y geometrías simples previamente definidas. Proporciona una menor asistencia por computadora en comparación con las herramientas CAD/CAM, ya que requiere una planificación previa por parte del operador para definir las herramientas, movimientos y secuencias. La asistencia que proporciona el uso del APT se focaliza en el procesamiento de información y ejecución, desde un principio verifica inconsistencias ortográficas y convierte el código, luego realiza una serie de operaciones matemáticas incluyendo geometrías y offset de herramientas, para finalmente ejecutar de manera lógica y ordenada. Sin embargo, como se dijo anteriormente hay una mayor responsabilidad sobre el programador, en comparación a la programación por CAD/CAM.

3.5.6.4. Programación asistida por CAD/CAM

La programación mediante sistemas CAD (Computer Aided Desing) y CAM (Computer Aided Manufacturing) consiste en el uso de softwares que proporcionan herramientas gráficas 2D y 3D para el diseño y fabricación mediante maquinas CNC.

Los primeros usos del diseño asistido por computadora (CAD) se dieron en la industria automovilística gracias al ingeniero francés Pierre Bézier, quien en 1968 patentó un el sistema de modelamiento 3D llamado UNISURF que era utilizado en el diseño de carrocerías para la empresa Renault. Actualmente todos los sistemas CAD cuentan con una interfaz de software que suele ser amigable con el usuario y tienen como función principal el modelamiento computacional a través de herramientas vectoriales como líneas, puntos y geometrías para generar planos de piezas, que luego a través de proyecciones generar volúmenes y superficies, que finalmente da origen a un código pieza que contiene toda la información. También el usuario puede otorgarle propiedades físicas a la pieza como la densidad, color, textura y tipo de material entre otras.

Por otro lado, la fabricación asistida por computadora (CAM) se daría con el lenguaje de programa “PRONTO” en el año 1957 gracias a Patrick J. Hanratty conocido como el “padre del CAD/CAM”, esto es debido a que al menos el 70% de los actuales

softwares comerciales ocupan como base de desarrollo los códigos de Patrick. Todos los softwares CAM de hoy proporcionan herramientas de manufactura para la realización de trabajos con remoción material y la adición de material. Principalmente el software se encarga de realizar un código para el programa de pieza con una intervención mínima del operador, generando de manera automática la ruta y funciones que debe ejecutar en cada punto. A su vez el software tiene la capacidad de procesar el programa de pieza generado y trazar trayectorias de movimientos que simulan el proceso antes de ser ejecutado, con esto el programador u operador puede revisar y modificar distintos parámetros como trayectorias, cabezales de herramienta y velocidades cuantas veces quiera, lo que permite asegurar el funcionamiento y resultado deseado sin desperdiciar tiempo ni material.

Cuando dentro de un proceso de fabricación se encuentra el diseño y manufactura asistida se reconoce como un sistema integrado de CAD/CAM.

3.5.7. Lenguaje de programación RS-274/NGC

El RS-274 corresponde a el lenguaje de programación del tipo Block Format más primitivo utilizado ampliamente para la programación en CN. Antes de la existencia del RS-274 cada fabricante utilizaba un lenguaje de programación distinto para crear el programa de pieza. Fue entonces en 1979 que la EIA (Electronic Industries Association) documenta una versión completa y mejorada, llamada “EIA Standard EIA-274-D”. Sin embargo, en 1994 el NCMS (National Center for Manufacturing Sciences) publicó una mejora llamada RS-274/NGC bajo el nombre de “Next Generation Controller Part Programming Functional Specifications (RS-274/NGC), la cual es la más aceptada actualmente por los sistemas CN y que se describirá en esta sección.

El RS-274/NGC es un lenguaje basado en líneas de código, también conocido como Block Format el cual incluye una serie de comandos para distintas funciones. Estas líneas o bloques se forman a partir de la composición de una palabra (word) seguido de un número (number). Una palabra puede comandar ejecutar una acción o argumentar una acción, es decir, una línea de código valido podría ser “G1 X5”, lo cual se traduce en que “G1” comanda el movimiento en línea recta a una velocidad predeterminada, mientras que “X5” indica un valor que complementa la información, indicando que al final del movimiento debe haberse movido 5 milímetros. La mayoría de los códigos en el lenguaje RS-274/NGC comienzan con una letra G o M por lo que comúnmente de les conoce como Código G o M.

3.5.7.1. Formato de línea

Para que una línea de código pueda ser entendible por el software no debe superar los 256 caracteres, de los cuales cualquiera que no esté dentro del lenguaje RS-274/NGC será rechazado cancelando la ejecución del programa. El carácter “/” está bloqueado y sirve para comentar dentro del código para hacer ciertas observaciones, además las líneas en blanco y los caracteres “TAB” y “SPACE” están permitidos en

cualquier parte de la línea y no altera su significado. También el programa puede distinguir entre mayúsculas y minúsculas.

3.5.7.2. Numero de línea

El número de línea corresponde a la letra N seguida por un numero de 5 dígitos, sin signo entre el rango 0 a 99999. La línea de numero será leída y ejecutada en orden, pueden repetirse y ser saltadas, pero si la información es requerida para el siguiente movimiento, debe ir escrita.

3.5.7.3. Palabra

Una palabra corresponde a cualquier otra letra que no sea la N seguida de un valor real. Un valor real es una agrupación de caracteres que puede procesarse y significar un valor, puede ser un numero explicito, un valor de parámetro, una expresión o un valor de operación unitario. Las palabras del lenguaje pueden ser cualquier letra descrita en la tabla 2.

Letra	Significado
A	Eje A de la maquina
B	Eje B de la maquina
C	Eje C de la maquina
D	Numero de compensación del radio de herramienta
F	Velocidad de avance
G	Funciones de código G generales
H	Índice de desviación longitudinal de herramienta
I	Desplazamiento en forma de arco en eje X Desplazamiento en ciclo fijo en eje X (G87)
J	Desplazamiento en forma de arco en eje Y Desplazamiento en ciclo fijo en eje Y (G87)
K	Desplazamiento en forma de arco en eje Z Desplazamiento en ciclo fijo en eje Z (G87)
L	Numero de repeticiones por ciclo Llave utilizada con comando G10
M	Funciones de código M generales
N	Línea de número
P	Tiempo de permanencia en ciclo fijo Tiempo de permanencia con comando G4 Llave utilizada con comando G10
Q	Incremento de alimentación en ciclos con comando G83
R	Radio de arco

S	Velocidad de husillo
T	Selección de herramienta
X	Eje X de la maquina
Y	Eje Y de la maquina
Z	Eje Z de la maquina

Tabla 2. Muestra las palabras utilizadas en el lenguaje RS-274/NGC y sus definiciones utilizadas para el control de máquinas CNC.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.7.4. Número

Dentro del lenguaje RS-274/NGC se le denomina número a todo carácter entre 0 y 9 o a un conjunto conformado por ellos. Existen ciertas reglas de procesamiento para un número dentro de las cuales se encuentran las siguientes:

- Un numero negativo debe ir acompañado siempre del signo menos (-), en cambio para los numero positivos mayores a cero el signo positivo (+) es opcional.
- Los ceros a la parte izquierda de un número serán ignorados, excepto el cero que viene antes de la coma en los números decimales.
- Un número puede contener todos los caracteres que se desee siempre que se respete la longitud de caracteres por línea.

3.5.7.5. Valor de parámetro

Un valor de parámetro corresponde a todos los valores numéricos que pueden ser modificados y almacenados para atribuirle características a un parámetro, como son las compensaciones de herramientas, puntos de origen 0 en diferentes ejes, velocidad de avance, etc. A cada parámetro le corresponde un valor entero entre 1 y 5399 acompañado por un #, seguido de un número real que representa el valor de ese parámetro.

3.5.7.6. Expresión y operación binaria

Se le llama expresión a un arreglo de caracteres que se encuentran dentro de corchetes “[]”. Dentro de una expresión se pueden ingresar números, valores de parámetro, operaciones matemáticas, etc. El valor dentro de una expresión es leído, procesado y evaluado de izquierda a derecha para entregar un número como resultado.

Por otro lado, una operación binaria corresponde a 9 operaciones lógico matemáticas que solo se dan dentro de una expresión. Estos operadores son:

- **Operadores matemáticos básicos:** Suma (+), resta (-), multiplicación (*) y división (/).

- **Operadores lógicos:** No excluyente (OR), excluyente (XOR), aditiva (AND).
- **Operador de módulos (MOD).**
- **Operador de potencia:** Un número base es elevado o potenciado (**) por un número exponente.

A su vez estos operadores se dividen en tres grupos, estos tienen preferencias sobre otras al momento de encontrarse en una misma línea. El orden de prioridad es el siguiente:

- **Grupo I:** Potencias.
- **Grupo II:** Multiplicación (*), división (/) y módulos (MOD).
- **Grupo III:** Suma (+), resta (-), no excluyentes (OR), excluyentes (XOR) y lógica de adición (AND).

Estas operaciones pueden aplicarse a cualquier número real. El número cero es asociado al falso lógico (false) y cualquier otro número distinto al cero está asociado con el verdadero (true).

3.5.7.7. Valor de operación unitario

Corresponde a ciertas operaciones matemáticas donde implique evaluar un número dentro de cierta función, el numero debe ir en la parte derecha del operador y entre corchetes "[]", los operadores son los siguientes:

Operador	Significado
SIN	Seno
COS	Coseno
TAN	Tangente
ACOS	Arco coseno
ASIN	Arco seno
ATAN	Arco tangente
ABS	Valor absoluto
EXP	Euler a la potencia
LN	Logaritmo natural
FIX	Redondeo hacia abajo
FUP	Redondeo hacia arriba
ROUND	Redondeo más cercano
SQRT	Raíz cuadrada

Figura 60. Muestra los operadores unitarios aceptados en el lenguaje RS-274/NGC.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.7.8. Grupos Modales

Los comandos modales están organizados en grupos modales, y solo un código del mismo grupo es admitido en la línea de código. La mayoría de los grupos están basados en lógicas donde es imposible que dos miembros del mismo grupo operen simultáneamente.

Grupos modales para códigos G		Función
Grupo 1	G0 G1 G2 G3 G38.2 G80 G81 G82 G83 G84 G85 G86 G87 G88 G89	Movimiento
Grupo2	G17 G18 G19	Selección de plano
Grupo 3	G90 G91	Modo de distancia
Grupo 5	G93 G94	Modo de velocidad de avance
Grupo 6	G20 G21	Unidad de medidas
Grupo 7	G40 G41 G2	Compensación del radio de corte
Grupo 8	G43 G49	Compensación de la longitud de herramienta
Grupo 10	G98 G99	Modo retorno en ciclo fijo
Grupo12	G54 G55 G56 G57 G58 G59 G59.1 G59.2 G59.3	Selección de sistema de coordenadas
Grupo 13	G61 G61.1 G64	Modo de control de trayectoria
Grupos modales para códigos M		Función
Grupo 4	M0 M1 M2 M30 M60	Desactivar funcionamientos
Grupo 6	M6	Cambio de herramienta
Grupo 7	M3 M4 M5	Modo de giro husillo
Grupo 8	M7 M8 M9	Refrigerantes
Grupo 9	M48 M49	Switch de alimentación y velocidad
Códigos G no modales		Función
Grupo 0	G4 G10 G28 G30 G53 G92 G92.1 G92.2 G92.3	Movimientos predefinidos configurables

Figura 61. Muestra los grupos modales de los comandos en el lenguaje RS-274/NGC.

Fuente: Elaboración propia

Un proceso puede estar siendo uso de distintos modos, ya que muchos de ellos vienen predefinidos y no cambian a menos que se le sea indicado. Cabe mencionar que

existe un error de código al utilizar códigos del grupo 1 y 0 simultáneamente, esto se debe a que ambos grupos se utilizan para realizar acciones de movimiento, y a la máquina se le es imposible ir y posicionarse en dos puntos al mismo tiempo. En otros casos cuando aparece un código del grupo 0 en una línea precedida de una línea con un código del grupo 1, la línea del grupo 0 es leída mientras que todas las acciones del grupo 1 son ignoradas.

3.5.7.9. Código G

Este es la familia de códigos más grande dentro del lenguaje RS-274/NGC y es ampliamente conocido en la programación por CN. Presenta en general códigos para comandar movimientos y configurar ciertos parámetros. A continuación, se presenta en detalle los principales códigos utilizados:

Código G	Significado
G0	Posicionamiento rápido
G1	Interpolación lineal
G2	Interpolación circular/helicoidal en sentido horario
G3	Interpolación circular/helicoidal en sentido anti horario
G4	Pausa según tiempo programado
G10	Ajustes de origen del sistema de coordenadas
G17	Selección de plano XY
G18	Selección de plano XZ
G19	Selección de plano YZ
G20	Selección de unidad de distancia en pulgadas
G21	Selección de unidad de distancia en milímetros
G28	Regreso a la posición de origen primaria
G30	Regreso a posición de origen secundaria
G38.2	Prueba en línea recta
G40	Cancela la compensación del radio de corte
G41	Comienzo de la compensación de radio izquierdo
G42	Comienzo de la compensación de radio derecho
G43	Compensación de la longitud de herramienta

G49	Cancela la compensación de la longitud de herramienta
G53	Movimiento en el sistema de coordenadas de la maquina
G54	Uso del sistema de coordenadas 1 preestablecido
G55	Uso del sistema de coordenadas 2 preestablecido
G56	Uso del sistema de coordenadas 3 preestablecido
G57	Uso del sistema de coordenadas 4 preestablecido
G58	Uso del sistema de coordenadas 5 preestablecido
G59	Uso del sistema de coordenadas 6 preestablecido
G59.1	Uso del sistema de coordenadas 7 preestablecido
G59.2	Uso del sistema de coordenadas 8 preestablecido
G59.3	Uso del sistema de coordenadas 9 preestablecido
G61	Establece el control de trayectoria: Trayectoria exacta
G61.1	Establece el control de trayectoria: Parada exacta
G64	Establece el control de trayectoria: Trayectoria continua
G80	Cancela el movimiento de cualquier ciclo fijo
G81	Ciclo fijo: Taladrado
G82	Ciclo fijo: Taladrado con pausa programada
G83	Ciclo fijo: Taladrado peck
G84	Ciclo fijo: Pulsación de mano derecha
G85	Ciclo fijo: Perforación, sin detenciones y salida a velocidad normal
G86	Ciclo fijo: Perforación con detención de husillo y salida rápida
G87	Ciclo fijo: Perforación trasera
G88	Ciclo fijo: Perforación con detención de husillo y salida manual
G89	Ciclo fijo: Perforación con pausa y salida a velocidad normal
G90	Modo de sistema de coordenadas absoluta
G91	Modo de sistema de coordenadas incremental
G92	Compensaciones del sistema de coordenadas y definición de parámetros

G92.1	Restablece a 0 todas las compensaciones del sistema de coordenadas y parámetros definidos.
G92.2	Restablece a 0 todas las compensaciones del sistema de coordenadas y omite los parámetros
G92.3	Aplica los parámetros de compensación al sistema de coordenadas
G93	Velocidad de avance en modo de tiempo inverso
G94	Velocidad de avance en modo unidades por minuto
G98	Retorno del ciclo fijo a los valores iniciales
G99	Retorno del ciclo fijo a los valores del punto R

Tabla 3. Muestra en lista los principales códigos junto a su función o significado.

Fuente: Elaboración propia

3.5.7.10. Código M

Otra familia de códigos perteneciente al lenguaje RS-274/NGC que es utilizada en procesos de mayor adaptabilidad y precisión donde se requiere más de una herramienta para realizar el trabajo. A continuación, se presentan los principales códigos utilizados:

Código M	Significado
M0	Detención de programa
M1	Detención de programa opcional
M2	Finalizar programa
M3	Giro de husillo en sentido horario
M4	Giro de husillo en sentido anti horario
M5	Detención de husillo
M6	Cambio de herramienta
M7	Encendido de refrigerante por rocío
M8	Encendido de refrigerante por chorro
M9	Apagado de refrigerantes
M30	Fin de programa, transporte de paleta y restablecimiento

M48	Habilita la configuración de la velocidad y alimentación anuladas
M49	Deshabilita la configuración de velocidad y alimentación
M60	Transporte de paleta y detención de programa

Tabla 4. Muestra en lista los principales códigos junto a su función o significado.

Fuente: Elaboración propia

3.5.8. Software e interfaz de control para maquinas CNC

El uso del software para ejecutar el programa de pieza representa la última etapa de procesamiento de información de antes de poner en marcha la maquina CNC. El operador al ingresar al computador y abrir el software controlador dispone de una serie de herramientas visibles que le ayudan a agilizar su uso como botones de emergencia, parada, puesta en marcha, indicadores de posición de cada eje, mapa de la trayectoria de herramienta, y también permite cambiar fácilmente parámetros sin necesidad de ingresar códigos. El objetivo del software e interfaz de control es procesar el código de pieza, interpretar la información entregada, hacerla visible y entendible para el usuario, para finalmente poner en marcha el programa de pieza.

Actualmente existen variados softwares comerciales y gratuitos que proporcionan herramientas similares para la programación y ejecución de códigos en CN. Sin embargo, todos ellos se encuentran estandarizados para hacerlos más compatibles y se rigen bajo las siguientes normas:

- **ISO 6983:2009:** *“Automation systems and integration – Numerical control machines – Program format and definitions of address words”*: Proporciona los requisitos y recomendaciones para los sistemas de control de posicionamiento. Promueve la coordinación y uso uniforme de las técnicas descritas en la norma para minimizar la variedad de programas requeridos para el procesamiento de información y fomentar la intercambiabilidad de programas entre maquinas CN.
- **RS274NGC:** *“Next Generation Controller Part Programming Functional Specifications”*: Define el lenguaje utilizado en CN y proporciona un intérprete de código al especificar una lista de comandos y sus funciones. También entrega una clasificación en grupos, estructura de lectura y orden de ejecución.

Al estar conectada la maquina CNC al software controlador proporciona un control casi absoluto sobre el movimiento de la máquina, a su vez el procesamiento de información ayuda a reducir los riesgos de accidentes o fallas durante la operación en una maquina CN. En la figura 62 se puede observar el software de libre acceso Openbuilds CONTROL y su interfaz de usuario.

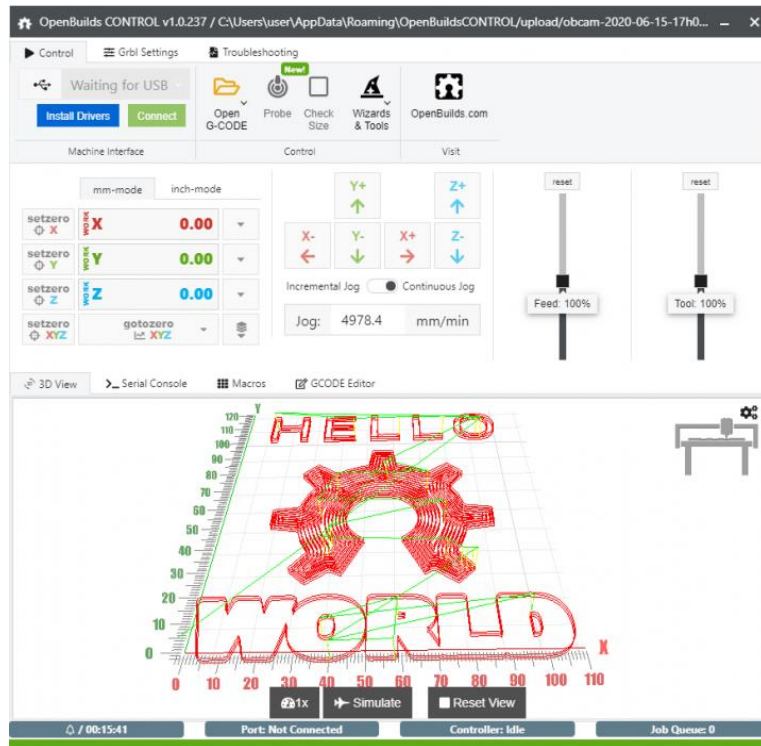


Figura 62. Muestra el interfaz del software Openbuilds CONTROL con un ejemplo de visualización de la trayectoria de la herramienta.

Fuente: Extraído de internet desde <https://software.openbuilds.com/>

3.5.9. Aplicaciones del control numérico

Durante muchos años el área más importante de aplicación para el control numérico ha sido el maquinado de metales, pero con el desarrollo tecnológico e industrial se ha expandido a otras áreas de manufactura. En muchas de las operaciones en CN se debe controlar un cabezal de trabajo o herramienta de trabajo para operar alrededor de una pieza de trabajo, según lo que se transporte como cabezal es que se distinguen dos categorías de trabajos en máquinas CNC: Aplicaciones de máquinas herramienta y aplicaciones sin máquinas herramientas.

El CN en aplicaciones con máquinas herramienta se encuentran principalmente máquinas CNC utilizadas en operaciones de maquinado como: torneado, taladrado y fresado. Estos procesos de manufactura han motivado el desarrollo de centros de maquinados altamente automatizados con el fin de agilizar y realizar diferentes operaciones de maquinado. Otro tipo de máquinas menos comunes en operaciones de maquinados son: esmerilado, prensa de láminas, doblado de tubos y corte térmico.

Por otro lado, las máquinas que no operan con máquinas herramientas incluyen máquinas que desempeñan cierta tarea específica sin la necesidad de remover material o

conformarlo, aquí se encuentran maquinas como: devanado de alambre, soldadura por fusión y resistencia, inserción de componentes electrónicos, dibujo y deposición de material como las descritas en la sección 3.1.

La automatización de procesos y el uso de las tecnologías CN tiene muchos beneficios por sobre la ejecución manual de un mismo trabajo de los cuales se pueden mencionar: Menor tiempo muerto, menor tiempo de operación, mayor flexibilidad de proceso, mayor exactitud y menos errores. Es por esto que distintos grupos industriales han ido incorporando estas tecnologías a sus procesos.

4. Diseño y selección de componentes para soldadora CNC

En este capítulo se presentará los distintos componentes para la construcción de la CNC y criterios de selección.

4.1. Configuración y características de la soldadora CNC

Debido a que la maquina a diseñar corresponde un proceso de adición de material, es decir, una aplicación sin máquina herramienta y no implican grandes fuerzas de mecanizado, se podrá énfasis principalmente a los componentes que se encargaran del proceso de soldadura, a los componentes encargados del sistema de posicionamiento y a los componentes alimentación de estaño.

Estructuralmente la maquina debe cumplir el requisito mínimo de poder proporcionar movimiento en los 3 ejes correspondientes X, Y y Z, que cumpla con un espacio de trabajo suficiente como para permitir el desplazamiento del cabezal y poder trabajar una PCB junto con sus componentes electrónicos. El tamaño comercial de las máquinas CNC es variado por lo que se considerará el tamaño de las placas comerciales PCB para dimensionar el espacio mínimo de trabajo que se requiere. Comercialmente se encontraron distintos tamaños de PCB siendo la mostrada en la figura 63 la placa que se utilizará en la puesta en marcha de este proyecto.

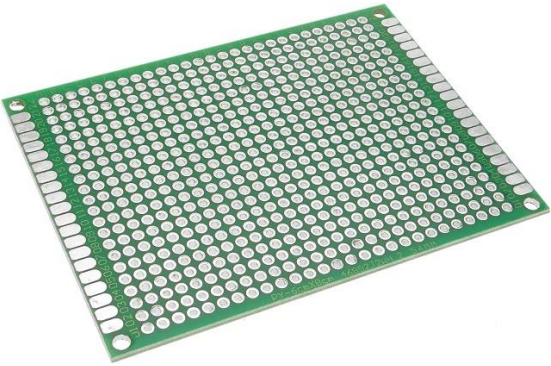
Componente : Placa PCB perforada	Características:
	Material: FR4 Fibra de Vidrio Espesor del Soporte: 1.5 [mm] Espesor Capa de Cobre: 35 [μm] Acabado: Baño de Estaño Paso entre orificios: 2.54 [mm] (0.1 pulgadas) Medidas: 90×150 [mm]

Figura 63. Muestra las características de la PCB a utilizar en la puesta en marcha de la maquina soldadora CNC.

Fuente: Extraído de internet desde <https://makerschile.cl/producto/placa-perforada-pcb-9x15cm-fr4-fibra-vidrio-doble-faz/>

Teniendo las características de la PCB se determina que la mesa de trabajo correspondiente al plano formados por los ejes X e Y debe permitir el desplazamiento de la punta del cabezal dentro de un área igual o mayor a 90x150 [mm]. Con respecto al eje Z se considera que debido al espesor de la placa y las patas sobresalientes de la inserción de los componentes electrónicos al menos la punta del cabezal debe poder bajar y subir 30 [mm].

Se determina también que si se quiere prestar menos atención a la parte estructural de la maquina CNC se debe de necesitar una unidad auxiliar para poder soportar y contener los elementos del sistema de alimentación de estaño, elementos de la fuente de poder, elementos electrónicos y panel de control. Es por esto que se pretende utilizar y adaptar un gabinete de PC para usarlo como unidad auxiliar dispuesta lo más cercana posible del cabezal de la máquina CNC. Se cuenta con el siguiente gabinete:

Componente: Gabinete PC



Figura 64. Muestra el gabinete disponible para utilizarlo como unidad de soporte auxiliar.

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Selección de mecanismo alimentador de estaño

El material utilizado en soldadura blanca comercialmente se encuentra de distintas maneras, principalmente el estaño se puede encontrar en forma de barras, varillas y alambres. Cada producto tiene un porcentaje distinto de la aleación estaño y plomo.

Según lo expuesto en las secciones 3.3 el uso del material de aporte en forma de alambre es utilizado en distintos procedimientos donde es aplicada una soldadura, así como también en distintos procesos de adición de material descritos en la sesión 3.1. Es por esto que se utilizará un método de alimentación que pueda utilizar un carrete con alambre de estaño SN60PB40, el cual es posible encontrar en ferreterías locales, las características del material se muestran a continuación:

Componente: Carrete de material de aporte estaño SN60	Características:
	Modelo: SN60PB40 Marca: ALPHA Peso: 250 gr Diámetro alambre: 0.8 [mm]

Figura 65. Muestra las características del material de aporte que será utilizado en el desarrollo de este proyecto.

Fuente: Extraído de internet desde <https://www.mcielectronics.cl/shop/product/rollo-de-soldadura-de-estano-250gr-28293>

Para hacer uso del carrete de estaño se utilizará un mecanismo similar al utilizado en el proceso de FDM descrito en la sesión 3.1.4 en la Figura 4. Este mecanismo cuenta de dos ruedas dentadas, una motriz solidaria al eje de motor y una conducida por acción de la rueda motriz, ambas ruedas se encuentran en contacto y presionadas por acción de un brazo de ajuste sobre el cual un resorte ejerce una fuerza que es regulada mediante un perno, ver Figuras 67.

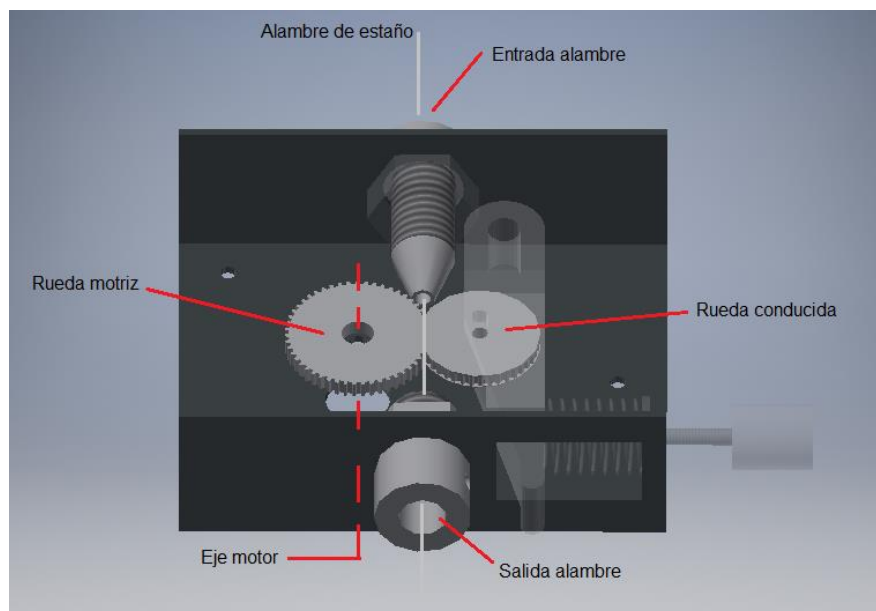


Figura 66. Mecanismo alimentador de material por ruedas dentadas

Fuente: Elaboración propia mediante software Autodesk Inventor.



Figura 67. Mecanismo comercial de ajuste mediante resorte para regular presión entre ruedas dentadas.

Fuente: Extraído de <https://www.ebay.com/itm/362795762074>

La rueda dentada motriz será accionada mediante pulsos eléctricos a través de un motor comercial de 12[V] que se automatizará con un relé. Al accionarse el motor y una vez que el material es agarrado por el mecanismo de ruedas dentadas, el alambre de estaño se moverá ya que se encontrará presionado por ambas ruedas, de esta manera el material de aporte será conducido mediante un conducto de poliuretano para ser fundido por el cabezal soldador.



Figura 68. Motor 12 [V]

Fuente: Extraído desde internet desde <https://www.hsiangneng.com/>

Cabe destacar la existencia de un producto que ofrece los requerimientos para fundir y depositar el material, este es el cabezal Extrusor MK8 de la figura 69. Ofrece una buena precisión

debido a las boquillas de deposición disponibles, pero cuenta con ciertas características que limitan el propósito del proyecto el cual busca realizar soldaduras automatizadas con material de aporte blando, si bien en la sesión 3.4.3.2 se establece que la temperatura ideal en el proceso de soldadura para el estaño debe ser alrededor de los 220 [°C]. En el apartado 3.4 se comienza definiendo la soldadura blanda como todo aquel proceso de soldadura por debajo de los 450 [°C], por lo cual existirá un rango de materiales que la maquina no podrá fundir, además el producto está diseñado para fundir materiales PLA (ácido poliláctico) y ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) que tienen un punto de fusión menor entre 150 a 220 [°C]. De todas maneras, existirán correcciones a futuro, pero se requiere priorizar la fundición del metal y el Extrusor MK8 se encuentra muy cerca del límite de fusión teórico del estaño.

Extrusor MK8	Características:
	Boquilla de extrusión: 0.3 [mm], 0.35 [mm], 0.4 [mm], 0.5 [mm] (opcional)
	Material principal de impresión: 1.75 [mm] o 3 [mm] PLA / ABS
	Caudal de boquilla: aproximadamente 24 [cc/h]
	Velocidad del eje deportivo: 40 [mm/s]
	Temperatura de trabajo normal: 190 [°C] a 230 [°C]
	Peso: 450 [g] Proveedor: Evoprint3D

Figura 69. Extrusor MK8 y sus características. Se compone de un mecanismo de alimentación de material de ruedas dentadas, cabezal fundidor y boquilla

Fuente: Extraído de internet desde <https://3dimpresora.net/tienda/extrusor-mk8-montado/>

4.3. Selección de cabezal soldador

Para la selección del cabezal se tendrá en consideración el mecanismo de alimentación de estaño y la precisión de la deposición de material.

El tipo de cabezal escogido para ser utilizado en el proyecto corresponde a la adaptación de una estación de trabajo de soldadura como la descrita en la sesión 3.4.3.4.3. Esta estación de

trabajo mostrada en la figura 71 cuenta con un cabezal soldador o cautín el cual es posible acoplarle un conducto de acero inoxidable que en su punta cuenta con una tobera resistente al calor que se encarga de dirigir el alambre de metal hacia el cautín, también cuenta una tarjeta de control con la cual es posible regular manualmente mediante cuatro perillas la velocidad de salida del alambre de metal, tiempo de recogida del alambre de metal, tiempo de suministración del alambre y la temperatura del cabezal soldador desde 200 [°C] a 480 [°C]. La punta del cabezal es calentada por una resistencia recubierta con material cerámico que se encarga de elevar la temperatura de la punta del cabezal compuesta de una aleación de níquel cromo.



Figura 70. Cabezal soldador de la estación de trabajo de soldadura S3100 y que se utilizara en este proyecto.

Fuentes: Extraído de internet de <https://www.ebay.com/itm/28444488596>

La estación cuenta con el mecanismo de alimentación de alambre de metal descrito anteriormente en la sesión 4.2, además de un eje de apoyo para el carrete de alambre de estaño. El mecanismo de esta estación de trabajo tiene incorporado un accionamiento manual por pedal el cual activa el motor de 12 [V] del mecanismo, moviendo la rueda dentada motriz y generando la salida del alambre, esto es utilizado para que el usuario pueda utilizar ambas manos durante el proceso de soldadura manual. Es este accionamiento manual por pedal el cual junto con el motor de 12 [V] el sistema que se pretende automatizar a través de un relé para controlar la alimentación de metal hacia el cabezal soldador.

La fuente de poder de la estación de soldadura, que será detallada más adelante, se encarga de alimentar la tarjeta controladora, el motor de 12 [V] y la resistencia eléctrica del cabezal soldador. El conjunto total de elementos de la estación de soldadura y algunas características se puede observar en la siguiente figura:

Componente: Estación de trabajo de soldadura S3100	Características:
	Rango de control de temperatura: 200 a 480 [°C] Diámetros de alambres de metal: 0,6 a 1,2 [mm] Tiempo de intervalo de salida de estaño: 0 a 2,7 [s] Tiempo de intervalo de retroceso de alambre: 0 a 0,9 [s] Velocidad de salida de alambre: 2,5 a 27 [mm/s]

Figura 71. Estación de trabajo y sus características que utilizara como cabezal soldador en la realización de este proyecto.

Fuente: Extraído de internet desde <https://www.amazon.com/Soldering-Automatic-soldering-multifunctional-temperature/dp/B07VGHP2Z>

4.4. Selección fuente de poder

Para suministrar energía a los distintos componentes de la maquina soldadora se utilizarán dos fuentes de poder. La primera fuente de poder corresponde a la integrada en la estación de soldadura mencionada en la sesión 4.3 la cual tiene una potencia de 60 [W] y suministrará a la resistencia del cabezal, a la tarjeta controladora de la estación y al motor del mecanismo de suministro de alambre. Y la segunda se encargará de suministrar energía a la tarjeta controladora que controla los drivers de motor, los motores paso a paso y el relé para automatizar el suministro de soldadura.

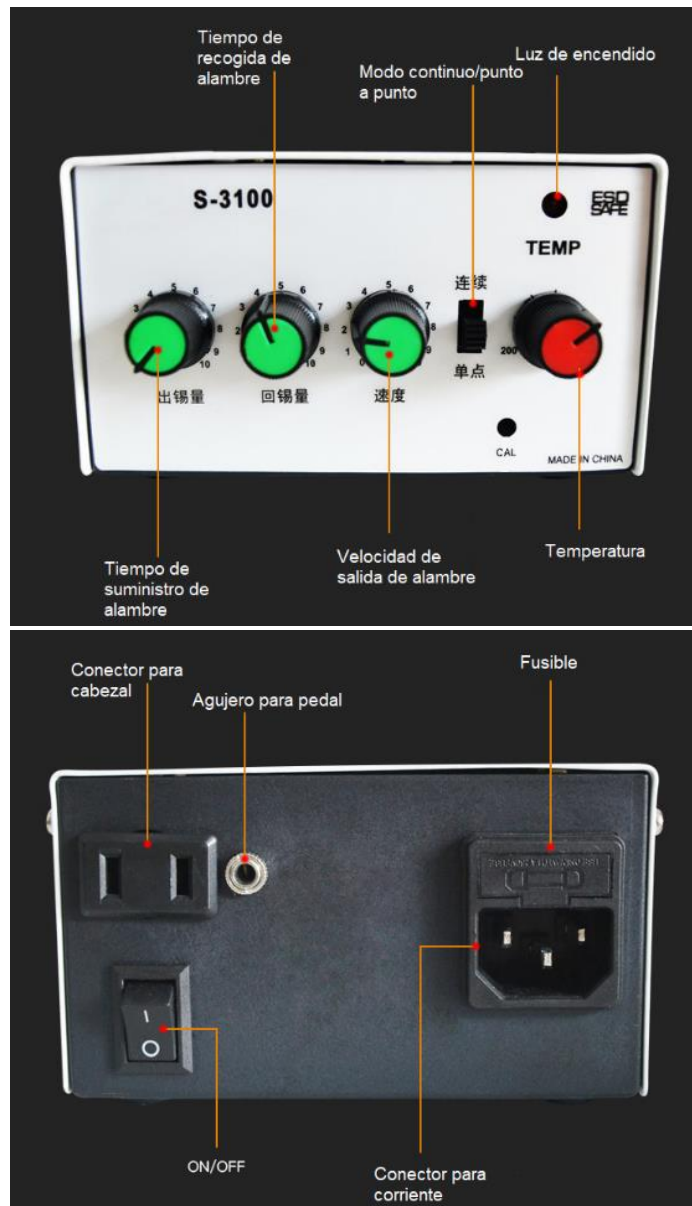


Figura 72. Fuente de poder de la estación de soldadura S3100 utilizada para suministrar energía al cabezal, pedal, tarjeta controladora y motor 12 [V].

Fuente: Elaboración propia a partir de la imagen extraída de <https://www.ebay.com/itm/362795762074>

La segunda fuente de poder corresponde a un transformador Liteon PE1300 que tiene un voltaje de salida de 12[V] el cual suministrará la tarjeta controladora encargada de comandar los motores paso a paso, sus drivers y el relé para el sistema de suministro de alambre.



Figura 73. Transformador Liteon pe1300 de 12 [V] utilizado en este proyecto.

Fuente: Imagen extraída de <https://www.ebay.es/itm/362999996700>

4.5. Selección de componentes estructurales

Como se pretende tener una configuración de CNC estándar se ha elegido buscar una CNC comercial para adaptarla al objetivo de este proyecto. El modelo CNC 3018 Pro es un kit CNC comercial que es utilizado principalmente como router CNC y corte laser, cuenta componentes estructurales y de posicionamiento que servirán para llevar a cabo el proyecto, dicho modelo es posible observarlo en la figura 74.



Figura 74. Kit CNC 3018 Pro

Fuente: Extraída de internet desde https://makerschile.cl/productos/maquinas_cnc/

Componentes Kit CNC 3018 Pro	Cantidad	Características:
Perfil ranura en v	2	20x40x290 [mm]
	2	20x20x360 [mm]
	1	15x180x200 [mm]
Guías lineales	2	Eje X 10x290 [mm]
	2	Eje Y 10x360 [mm]
	2	Eje Z 8x95 [mm]
Husillo de Ø8 [mm] y paso 4[mm]	1	Eje X 300 [mm]
	1	Eje Y 365 [mm]
	1	Eje Z 90 [mm]
Soportes base de baquelita	2	Eje X 10x45x360 [mm]
	2	Eje Y 10x120x220 [mm]
Motor paso a paso Nema 17	3	Voltaje nominal: 12 [V] 1,2 [A] 0,3 [Nm] Angulo de paso: 1,8° Pasos por revolución: 200
Cojinetes guías X	4	Ø= 10 [mm]
Tuerca eje guía X	1	Ø= 8 [mm] Paso = 4 [mm]
Acoples motor eje	3	Ø = 8 [mm]
Pernos y tuercas varias	-	Pernos M3 M5 M6 Tuercas T M5 M6
Tuerca anti backlash con resorte	3	Ø= 8 [mm] Paso = 4 [mm]

Carro de eje	3	Eje X: Perfil aluminio 15x180x200 [mm] Eje Y: Carro 58x68x100 [mm] Eje Z: Carro 38x60x85 [mm]
Rodamiento radial de bolas	3	608ZZ: $\varnothing_i=8$ [mm] $\varnothing_o=22$ [mm] L= 7 [mm]
Rodamiento lineal de bola	8	LM10UU: $\varnothing_i=10$ [mm] $\varnothing_o=19$ [mm] L= 29 [mm]
	2	LM8UU: $\varnothing_i=8$ [mm] $\varnothing_o=15$ [mm] L= 24 [mm]

Tabla 5. Componentes dentro del kit CNC 3018 y sus características.

Fuente: Elaboración propia a partir de un levantamiento de información y apoyo de “Kit CNC 3018 Pro – Installation and instructions”

Este kit está diseñado y pensado para iniciarse en las tecnologías de CNC, se basa en Arduino y GRBL los cuales son lenguajes de código abierto. Una vez armada tiene un área efectiva de operación de 40x170x300 por lo que cumple los requisitos mínimos discutidos en la sesión 4.1.

4.6. Descripción de componentes del sistema de posicionamiento

En esta sesión se describirán los componentes del sistema de posicionamiento que vienen dentro del kit CNC mencionado anteriormente en la sesión 4.5. Estos componentes como se describe en la sesión 3.5.5 tienen directa relación con la precisión y el resultado final de una operación programada por CN.

4.6.1. Carros de eje

Cada eje cuenta con un carro o mesa la cual se mueve de manera lineal a través de un eje, este carro cumple la función de no solo moverse, sino también proporcionar soporte y transporte a otros elementos importantes del sistema de posicionamiento.

4.6.1.1. Carro X

En el eje X el carro o mesa de trabajo corresponde a un perfil de aluminio de dimensiones 15x180x300 [mm] que se puede ver en la figura 75. Para moverse a través del eje X la mesa cuenta con dos elementos mecánicos que se le acoplan a la estructura mediante pernos M5 y tuercas M5 tipo T, estos son los descansos para las guías lineales y la tuerca motriz.

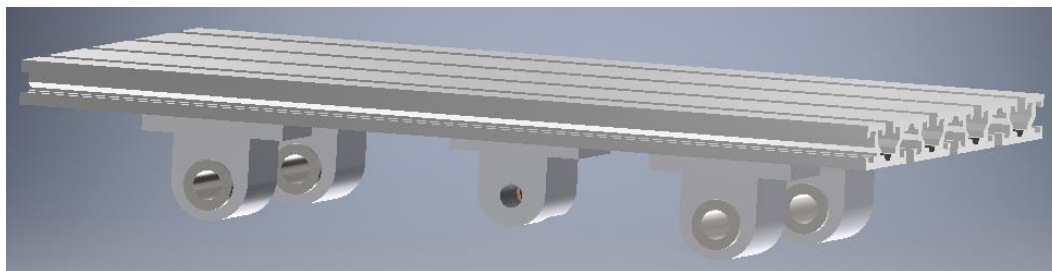


Figura 75. Carro X.

Fuente: Elaboración propia a partir de software Autodesk Inventor.

Los cuatro descansos están proporcionados de un rodamiento lineal de bolas LM10UU el cual garantiza un deslizamiento suave de las guías lineales del eje X. Y la tuerca motriz acoplada a la mesa cuenta con una rosca ACME y su sistema antibacklash.

El carro X funciona como mesa de trabajo, ya que sobre ella se pondrá la PCB sujeta junto con los distintos elementos electrónicos para ser procesada. Es por ello que durante el ensamblaje debe asegurarse una correcta alineación y sujeción de los distintos elementos mecánicos.

4.6.1.2. Carro Y

Por el eje Y se desplaza un cuerpo que cuenta con un marco dimensional de 58x68x100 [mm] que se puede apreciar en la figura 76.

El carro Y dentro del kit viene ensamblado junto con el motor paso a paso, guías lineales y eje motriz del eje Z. Además, tiene en su estructura cuatro rodamientos lineales LM10UU para las guías lineales del eje Y, un eje roscado ACME y su tuerca antibacklash para el eje motriz del eje Y. Se encarga de transportar el carro Z y con ello el cabezal soldador por todo el eje Y.

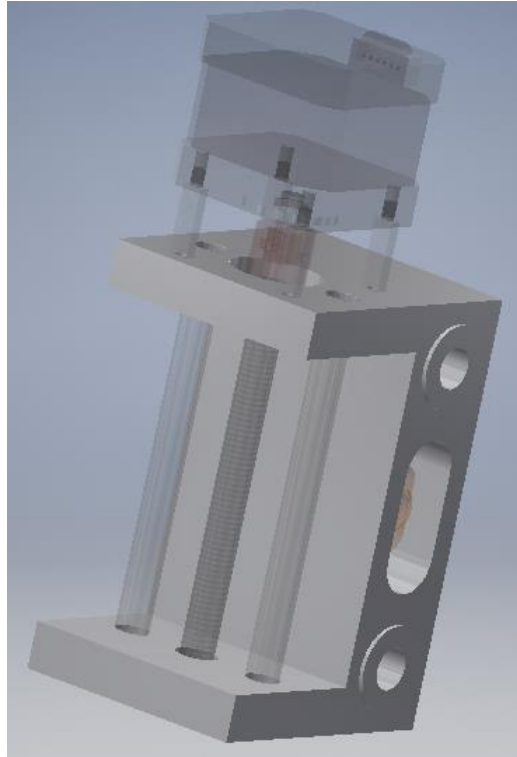


Figura 76. Carro Y.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Autodesk Inventor.

4.6.1.3. Carro Z

En el eje Z se desplaza un carro que cuenta con un marco dimensional de 38x60x85 [mm] que se puede apreciar en la figura 77. Su estructura cumple la función de abrazadera para el cabezal que es envuelto y apretado por un tornillo, sin embargo, dado que el kit CNC está fabricado para un cabezal router o laser es que tendrá que desarrollar un mecanismo de sujeción para el cabezal soldador, que se describirá en la sesión 4.7.

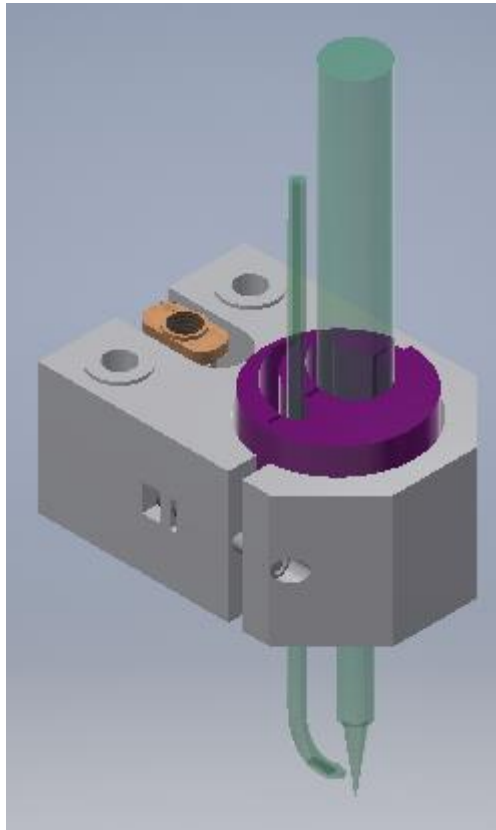


Figura 77. Carro Z.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Autodesk Inventor.

4.6.2. Eje motriz

El eje motriz o tornillo sin fin es un elemento mecánico de transmisión de movimiento, el cual dentro de las maquinas CNC es el encargado principal de transmitir el movimiento giratorio generado por el motor paso a paso y hacia la mesa de trabajo que se mueven de manera lineal en cada eje, es por eso que se conocen como tornillos de potencia, ya que este tipo de tornillos son usados principalmente para ejercer y soportar grandes cargas axiales, se puede observar en la figura 78.

Este tipo de transmisión se prefiere principalmente debido a que es el viene con el kit CNC, sin embargo, existen otros tipos de mecanismos de transmisión de movimiento como lo es por correas y poleas dentadas. También cabe mencionar que existen otros tipos de tornillos sin fin llamados tornillos de bolas recirculantes las cuales ofrecen una mayor precisión a cambio de un costo más elevado.



Figura 78. Tornillo guía referencial que se utilizará en este proyecto

Fuentes: Extraída de internet desde <https://www.ebay.com/itm/224665243731>

La rosca utilizada por este tipo de tornillos es una rosca trapezoidal ACME como la de la figura 79, y se puede encontrar en mecanismos como gatas hidráulicas, prensas y en máquinas CNC. Suelen soportar una alta fricción debido al roce de contacto que se genera entre las superficies del tornillo y tuerca motriz, lo que suele ser negativo debido a la oposición al movimiento y positivo debido a un efecto auto bloqueante al desacelerar el movimiento.

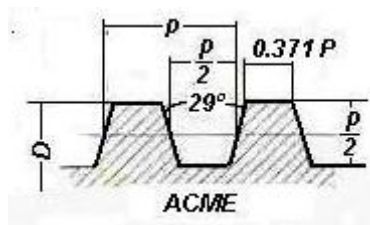


Figura 79. Muestra características de una rosca ACME.

Fuente: Extraído de internet desde <http://www.fullmecanica.com/definiciones/r/146-rosca-acme>

Las características y parámetros de los ejes roscados utilizados en este proyecto son:

- Material: Acero inoxidable
- Diámetro nominal: 8 [mm]
- Forma rosca: Trapezoidal
- Numero de filetes: 2

- Paso: 2 [mm]
- Avance: 4 [mm]
- Angulo rosca: 29°

4.6.3. Tuerca motriz

La tuerca motriz corresponde a otro elemento mecánico esencial en la transmisión de movimiento, ya que junto con el eje motriz se encargan de transformar la potencia del motor en movimiento lineal. Esta tuerca se encuentra acoplada por un lado al carro de eje y por otro lado se encuentra el eje motriz roscado a la tuerca, la cual cuenta con el mismo perfil ACME del eje motriz descrito en la sesión anterior. En los casos de los carros Y, Z la tuerca motriz es el mismo carro, es decir, la rosca ACME de la tuerca motriz está inserta en la estructura del carro, para que se entienda mejor, observar las figuras 80.

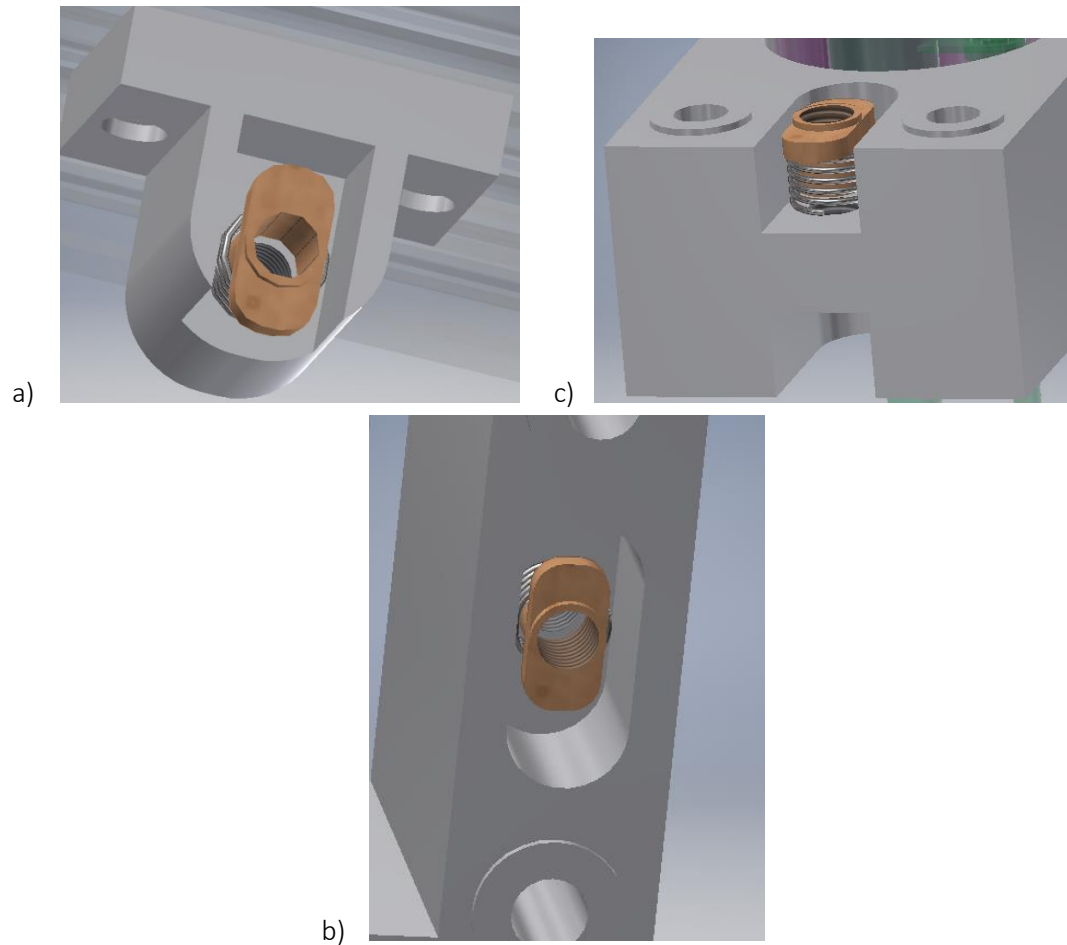


Figura 80. Tuercas motrices de cada eje a) Eje X, b) Eje Y y c) Eje Z con sus respectivas tuercas antibacklash.

Fuente: Elaboración propia a partir de software Autodesk Inventor.

Características de la tuerca motriz de los ejes X, Y, Z:

- Material: Bronce
- Diámetro nominal: 8 [mm]
- Forma rosca: Trapezoidal
- Numero de filetes: 2
- Paso: 2 [mm]
- Avance: 4 [mm]
- Angulo rosca: 29°

Cabe señalar que se debe tener especial cuidado con el backlash descrito en la sesión 3.5.5.4, ya que es entre la tuerca motriz y el tornillo motriz donde se produce este efecto. Para corregir y evitar cualquier manifestación de este fenómeno se dispone de una tuerca anti-backlash de resorte en cada eje, el cual se encargará de mantener las superficies de la tuerca y eje motriz siempre en contacto.

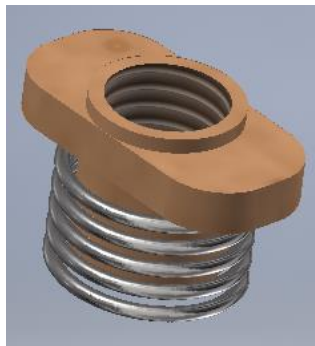


Figura 81. Sistema anti-backlash de resorte dispuesto en cada eje.

Fuente: Elaboración propia a partir de software Autodesk Inventor.

El principio de acción del sistema antibacklash por resorte, recae en el efecto que produce en las superficies de contacto entre el tornillo sin fin o eje motriz y la tuerca motriz. Esta tuerca antibacklash cuenta con una rosca ACME para insertarse junto con un resorte en el eje motriz, de tal forma que el resorte quede presionado entre las superficies de la tuerca motriz con la de la tuerca antibacklash, de este modo el resorte al estar sometido a una fuerza de compresión ejerce una fuerza opuesta provocando que la superficie de contacto de los hilos del eje y tuerca motriz estén sometidas a una compresión constante anulando los deslizamientos.

Características tuerca antibacklash:

- Material: Bronce
- Diámetro nominal: 8 [mm]
- Forma rosca: Trapezoidal
- Numero de filetes: 2

-
- Paso: 2 [mm]
 - Avance: 4 [mm]
 - Angulo rosca: 29°

4.6.4. Guías lineales

Las guías lineales son elementos mecánicos del sistema de posicionamiento que tienen como función asegurar que el carro de eje tenga un movimiento recto y estable a lo largo de todo el eje. Estos elementos suelen ser de longitud extensa por lo que necesitan apoyos o descansos para distribuir las cargas y también de rodamientos para facilitar el deslizamiento por las guías.



Figura 82. Ejes guías lineales que se utilizarán para todos los ejes.

Fuente: Extraída de internet desde <https://hifisac.com/shop/product/wcs10-1000-eje-guia-lineal-de-10mm-diametro-x-1-metro-largo-para-cnc-6686#attr>

Características del eje guía lineal:

- Material: Acero al carbono cromado
- Dureza: HRC62 $\pm$ 2
- Tolerancia: g6 h6
- Rugosidad: $\leq$ 8 [mm] (Rmax)
- Diámetro: 10 [mm]
- Redondez: $\leq$ 3 [mm] (Rmax)

La guía para los carros de eje escogidos para este proyecto, corresponde a ejes guías lineales como los de la figura 82 que en sus extremos cuenta con una perforación roscada M5. Cada eje cuenta con un par de ejes guías lineales que se disponen de manera paralela y uno a cada costado del eje motriz, estas son sujetas a la estructura de la CNC mediante pernos M5. Las guías lineales de los ejes pasan a través del carro por medio de rodamientos que se encuentran acoplados en las estructuras de los carros de cada eje.

4.6.5. Rodamientos

Los rodamientos que se encuentran acoplados en la estructura de los carros de eje corresponden al tipo lineal de bolas el cual se puede ver en la figura 83. Específicamente los rodamientos LM8UU en el eje Z y LM10UU en los ejes X, Y. Los rodamientos se encargan de mitigar los efectos del roce en las guías lineales durante el movimiento de los otros elementos mecánicos del sistema de posicionamiento.



Figura 83. Rodamiento lineal de bolas.

Fuente: Extraída de internet desde <https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-573013659-pack-2pcs-rodamiento-lineal-lm8uu-8mm-largo-29mm-max-- JM>

Características rodamientos lineal de bola LMXXUU:

- Material: Cuerpo de acero al carbono cromado con reten de nitrilo NBR.

Como apoyo para el eje motriz se encuentra un rodamiento radial de bola 608ZZ como el de la figura 84 que es acoplado a las estructuras bases de baquelita soportando un extremo del eje motriz. Este rodamiento permite que el movimiento giratorio del tornillo sin fin accionado por el motor paso a paso en un extremo gire suavemente, disminuyendo fuerzas de roces que se oponen al movimiento. Se dispone de tres cojinetes, uno para cada eje motriz.



Figura 84. Rodamiento radial de bolas 608zz.

Fuente: Extraído de internet desde <https://www.ebay.com/itm/271533189811>

Características rodamientos radial de bola 608zz:

- Material: Cuerpo acero al carbono con reten de nitrilo NBR.

1.1.1. Motor paso a paso

Los motores paso a paso son elementos electromecánicos que se encargan de transmitir potencia mecánica al eje motriz de cada eje a partir de la energía eléctrica que alimenta el motor. El motor seleccionado para el proyecto corresponde a un motor paso a paso bipolar que es comandado por la MCU mediante pulsos eléctricos, los cuales generan un desplazamiento angular en el eje del motor. Este funcionamiento ofrece ventajas significativas al momento que se requiere exactitud y precisión en los movimientos.

Algunas ventajas que ofrecen los motores paso a paso son:

- Exactitud y precisión en movimientos repetitivos.
- Error de paso inferior al 5%
- Fácil control de velocidad de rotación y posicionamiento



Figura 85. Motor paso a paso NEMA 17 42SHDC3025-24B.

Fuente: Extraído de internet desde <https://www.mcielectronics.cl/shop/product/motor-paso-a-paso-nema-17-200-pasos-11329>

El motor paso a paso comercial NEMA 17 estandarizado por la National Electrical Manufacturers Association (NEMA) tiene las siguientes características:

- Modelo: Nema 17

-
- Pasos: 200 (1.8°/paso)
 - Angulo de paso: 1.8°
 - Numero de fases: 2
 - Tensión de bobina: 4 [V]
 - Corriente máxima 0.9 [A]
 - Impedancia: 4.4 [Ω]
 - Torque de bloqueo: 0.34 [Nm]
 - Temperatura de operación: -20 [°C] a 50 [°C]
 - Humedad máxima de operación: 90%
 - Diámetro de eje: 5 [mm]

El motor cuenta en sus cuatro esquinas con orificios roscados que sirven para ser acoplado a la estructura CNC mediante pernos M3. Al eje del motor paso a paso se le es insertado un acople rígido 5/8 [mm] que junta con el eje motriz, estos son ajustados mediante prisioneros M2 dentro del acople de la figura 86.

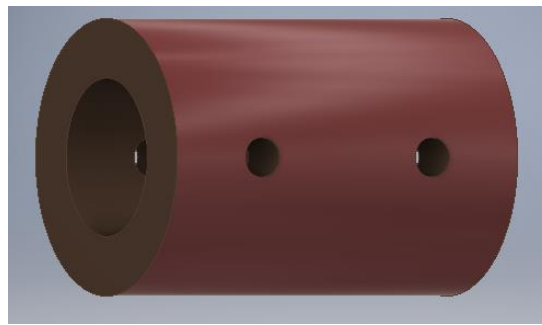


Figura 86. Acople rígido 5/8 [mm].

Fuente: Elaboración propia a partir del software Autodesk Inventor.

Cabe destacar que existen también otros tipos de motores paso a paso como los de imán permanente, reluctancia variable e híbridos que ofrecen las mismas ventajas, sin embargo, los motores bipolares paso a paso actualmente son altamente comercializables y fáciles de adquirir, además se encuentran dentro del kit CNC.

4.7. Diseño abrazadera para adaptación cabezal

La abrazadera diseñada funciona bajo el mismo principio que una abrazadera tradicional, es decir, ejercer una fuerza de compresión alrededor de uno o varios cuerpos para ajustar, comprimir y asegurar. Es importante tener firmeza en el agarre del cabezal soldador, ya que se los procesos en CNC constantemente están sometidos a vibraciones que pueden provocar desajustes y con ellos generar imprecisiones. El diseño de la abrazadera puede ser visto en la figura 87.

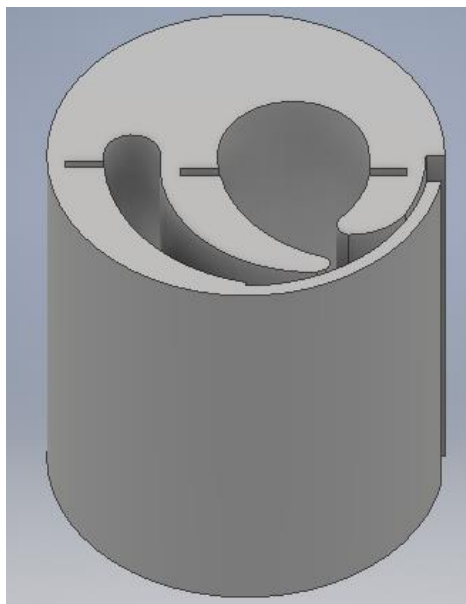


Figura 87. Abrazadera para cabezal soldador.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Autodesk Inventor.

La abrazadera será insertada junto con los elementos del cabezal soldador y será ajustada mediante el perno que se encuentra en la abrazadera del carro Z como se ve en la figura 88. Se pretende que el material sea lo suficientemente flexible y antideslizante como para asegurar el cabezal soldador.

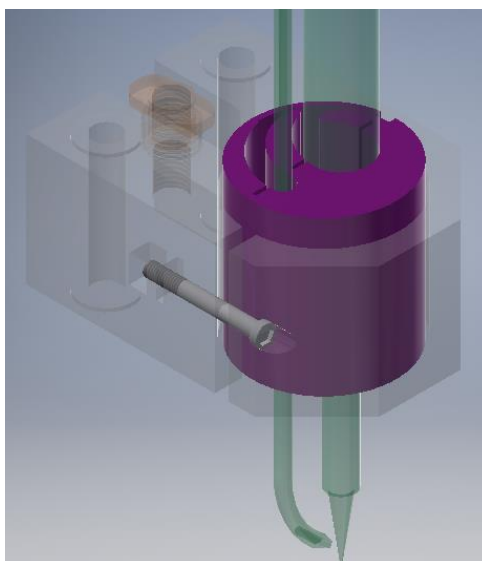


Figura 88. Mecanismo de apriete para cabezal soldador en el carro Z.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Autodesk Inventor.

4.8. Unidad de apoyo: Gabinete

El gabinete se utilizará como apoyo para albergar los elementos pertenecientes al sistema de alimentación de estaño y del sistema electrónico. En la figura 89 se encuentran los distintos elementos distribuidos por el gabinete de PC como la tarjeta controladora con las perillas de ajuste del sistema de alimentación de alambre, el soporte para el carrete de estaño y el mecanismo de alimentación de alambre. En su interior irán distribuidos la tarjeta controladora de maquina CNC junto con los drivers de los motores paso a paso y las dos fuentes de alimentación.

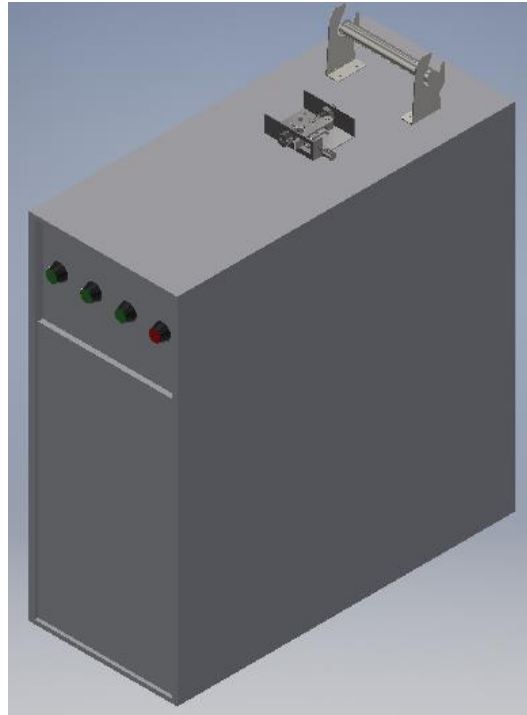


Figura 89. Gabinete adaptado con los elementos de la estación de trabajo S3100.

Fuente: Elaboración propia a partir de software Autodesk Inventor

4.9. Selección de hardware, firmware y software

En esta sección se discutirá parte de los elementos electrónicos que se utilizaran para programar, comandar y controlar. Son componentes esencialmente dependientes entre sí, que dan vida a la parte computacional de la maquina CNC.

4.9.1. Hardware

El hardware corresponde a todos los elementos físicos y tangibles del sistema electrónico como las tarjetas controladoras, drivers de motor, relés, cables, etc. Estos componentes se describen a continuación:

4.9.1.1. CNC Shield GRBL v3.0 Arduino UNO

La CNC Shield V3.0 es un módulo montable de expansión de Arduino desarrollado por Protoneer.co.nz a un bajo costo, debido a que la gente demandaba crear sus propias máquinas automatizadas. Esta tarjeta es utilizada para manejar motores paso a paso de manera sencilla y rápida a través de Drivers A4988, que junto a una placa Arduino UNO forman una tarjeta controladora eficiente, eficaz y económica, ampliamente utilizada en el desarrollo de proyectos de automatización a través del control de motores paso a paso.

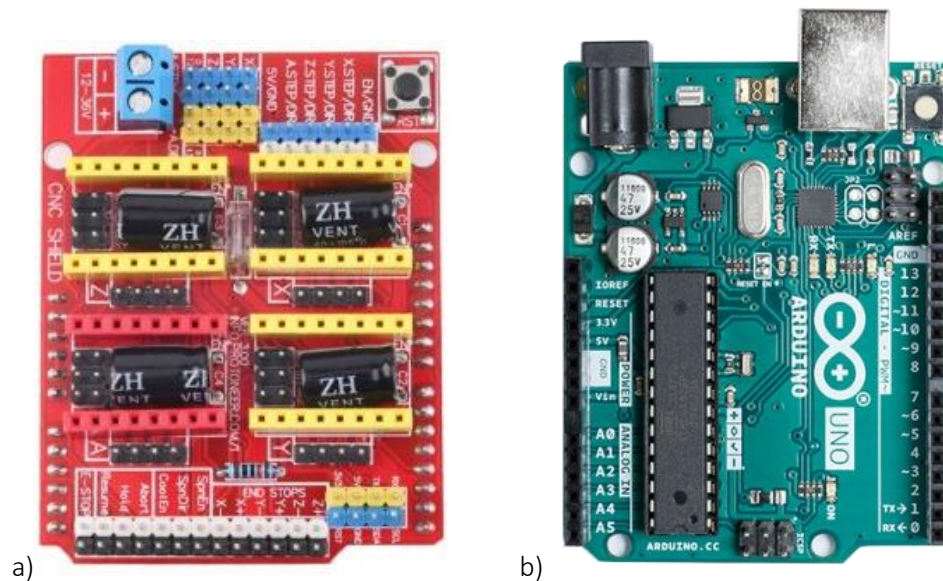


Figura 90. Tarjeta controladora compuesta por el a) módulo de expansión CNC Shield v3.0 y b) microcontrolador Arduino UNO ATmega328P.

Fuente: Extraído desde internet desde <https://arduino.cl/producto/arduino-uno/>

La tarjeta permite controlar 4 motores paso a paso mediante conectores tipo molex de 4 pines. De manera independiente puede controlar los 3 ejes principales X, Y, Z además de uno adicional A como duplicado de uno de los 3 anteriores. El modulo debe utilizar una fuente de poder de entre 12 [V] y 36 [V] para abastecer de corriente los motores paso a paso, también cuenta con dos finales de carrera para cada eje, comunicación con interfaz vía USB, entre otros. Los pines de la placa Arduino Uno puede ser vista en la figura 91.

Características Arduino Uno:

- Microcontrolador ATmega328.
- Voltaje de entrada 7-12V.
- 14 pines digitales de I/O (6 salidas PWM).
- 6 entradas análogas.

- 32k de memoria Flash.
- Reloj de 16MHz de velocidad.
- Dimensiones: 68.6mm x 53.4mm

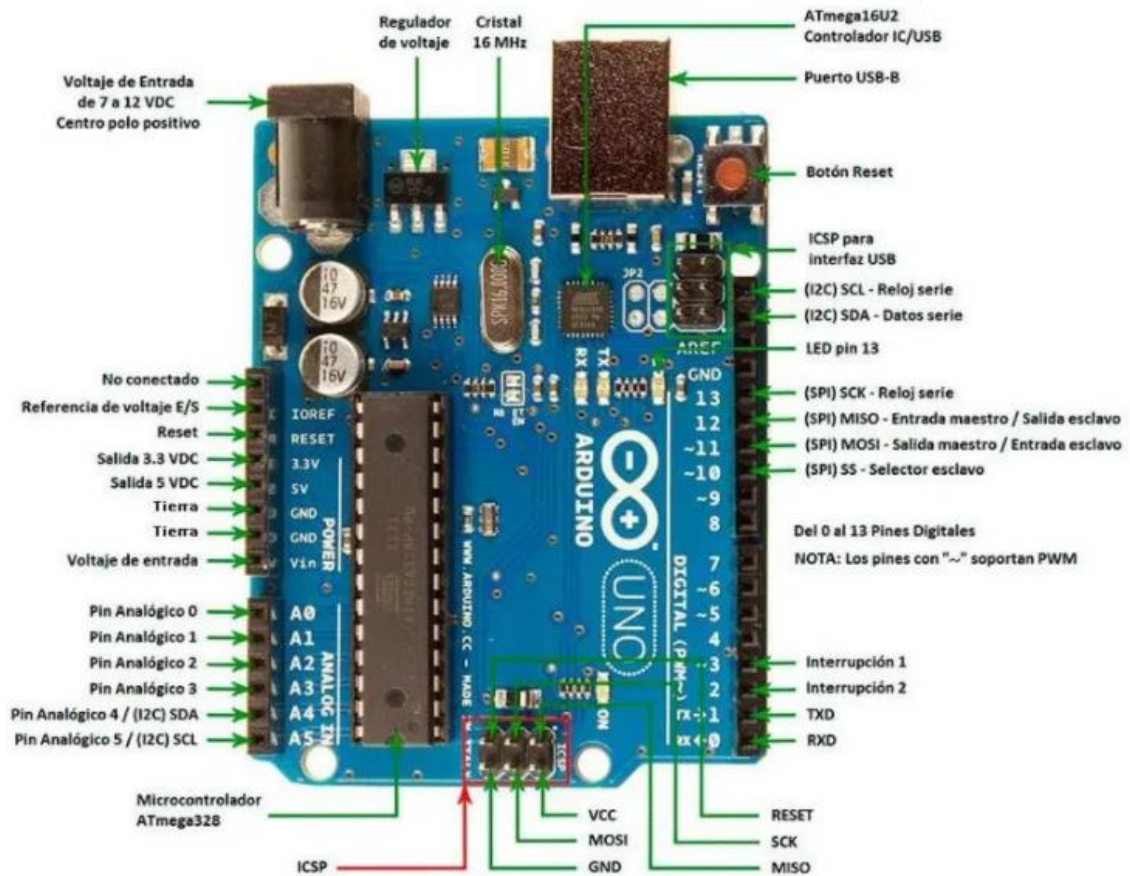


Figura 91. Esquema de componente, señales de entrada y salida de la placa Arduino Uno.

Fuente: Extraído de internet desde <https://arduino.cl/producto/arduino-uno/>

Esta tarjeta de control es compatible con el firmware GRBL el cual es un soporte lógico inalterable basado en código G que controla los elementos eléctricos de la placa, fue desarrollado por bajo políticas de licencia GNU, es decir, de libre acceso para la comunidad.

4.9.1.2. Driver Papolu A4988

El driver Papolu A4988 es un controlador de motor bipolar paso a paso utilizado en el desarrollo de máquinas CNC de código abierto, es compatible con placas RAMPS y CNC Shield. A través de un potenciómetro es posible regular el amperaje máximo de salida hasta 2 [A]. Cuenta con un disipador de calor para operaciones prolongadas.

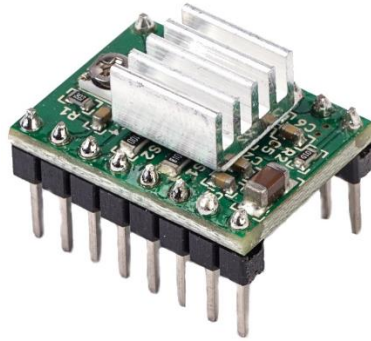


Figura 92. Driver Papolu A4988.

Fuente: extraído de internet desde <https://www.cimech3d.cl/producto/a4988-driver-motor-paso-a-paso/>

Características de driver Papolu A4988:

- Voltaje de operación: 8-35 [V]
- Corriente por fase: 1.5 [A]
- Máxima corriente por fase: 2 [A]
- Micro-pasos: Full – 1/2 – 1/4 – 1/8 – 1/16
- Protección de polaridad inversa: No
- Protección térmica: Si

Este driver es montado sobre los 16 pines de la placa CNC Shield que se encuentran de manera paralela y marcados con la letra del eje al que pertenece ese controlador, cuenta con un potenciómetro que puede ser regulado con un pequeño destornillador estándar de cruz. Este controlador se encarga de enviar todas las señales necesarias para controlar el motor paso a paso.

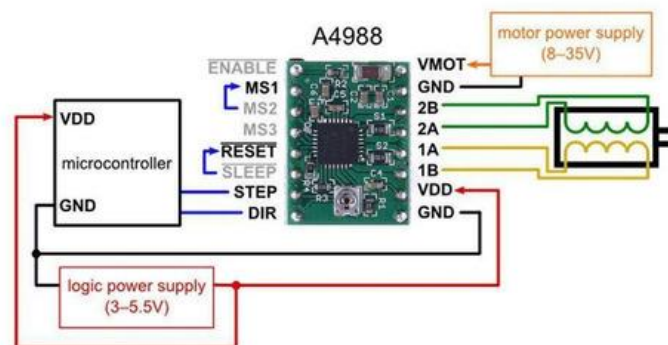


Figura 93. Esquema de señales de los pines del controlador A4988.

Fuente: Extraído de internet desde <https://www.cimech3d.cl/producto/a4988-driver-motor-paso-a-paso/>

4.9.1.3. Tarjeta de estación S3100

La tarjeta controladora de la estación de trabajo S3100 no corresponde a un elemento estandarizado, más bien está diseñado exclusivamente para desempeñar las funciones específicas de la estación de soldadura. Como se puede ver en la figura 94 cuenta con cuatro potenciómetros de perilla, cuatro conectores tipo molex 1 de 3 pines y 3 de 2 pines, luz de encendido del cabezal y switch de deposición punto a punto a deposición continua, además de otros elementos electrónicos.

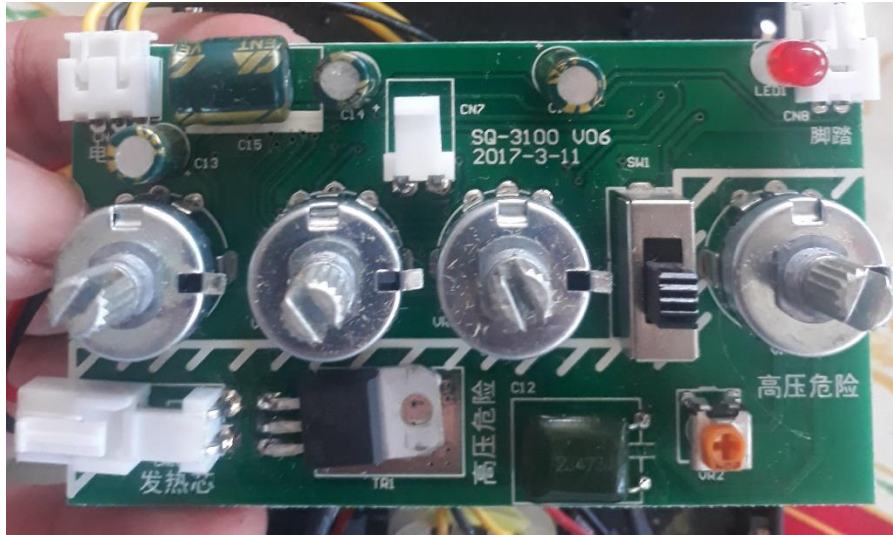


Figura 94. Tarjeta controladora de la estación de soldadura S3100.

Fuente: Elaboracion propia a partir del despiece de la estación de soldadura S3100.

Las cuatro perillas de regulación manual corresponden a los potenciómetros encargados de regular el tiempo de alimentación del alambre de metal, tiempo de retroceso de alambre de metal a velocidad constante, la velocidad de salida del alambre de metal y temperatura del cabezal soldador, respectivamente de izquierda a derecha en la figura 94.

Los cuatro conectores de tipo molex de la placa cumplen la función de energizar el motor de 12 [V], energizar el cabezal soldador, sensor de señal de accionamiento y entrada de abastecimiento de energía para la tarjeta controladora.

El switch de cambio de modo de soldadura también tiene un accionamiento manual. Si el modo de deposición de alambre es cambiado, la señal de accionamiento debe ser comandada nuevamente para ejecutar la deposición de material en el nuevo modo.

4.9.1.4. Relé

El módulo de relé utilizado en el proyecto corresponde a un relé de canal único como la de la figura 95, cuenta con capacidad de manejar cargas máximas 10[A]/250[V]AC y 10[A]/30[V]DC lo cual es suficiente para el accionamiento del motor del sistema de alimentación de alambre de este proyecto. Posee luces led roja y verde como indicadores de alimentación y activación respectivamente. El relé activa la salida normalmente abierta al recibir un “0” lógico (0[V]) y desactiva la salida con un “1” lógico (5[V]). Es compatible con Arduino y otras placas como la Raspberry Pi.



Figura 95. Relé

Fuente: Extraído de internet desde <https://makerschile.cl/producto/rele-relay-5v-modulo-de-1-canal-250v-10amp-arduino-2/>

Características relé:

- Voltaje de Operación: 5 [V] DC
- Canales: 1
- Capacidad máx.: 10[A]/250[V]AC, 10[A]/30[V]DC
- Corrientes máx.: 10[A] NO, 5[A] NC
- Tiempo de acción: 10 [ms] / 5 [ms]

4.9.2. Firmware

El firmware es el conjunto de normas lógicas con la cual son controladas y comandadas las acciones dentro del hardware.

El firmware cargado en la placa Arduino Uno corresponde al GRBL1.1 de código abierto y que contiene todo el algoritmo de procesamiento lógico necesario para ejecutar las acciones en máquinas CN. Este firmware fue desarrollado por Simen Svale Skogsrud y su licencia fue liberada y distribuida bajo los términos y políticas del MIT, específicamente corresponde a una adaptación del lenguaje RS-274/NGC escrito en C optimizado para ser

compatible con placas Arduino. El intérprete GRBL1.1 es altamente compatible con la herramienta CAM descrita anteriormente en la sesión 3.5.6.4.

El firmware puede ser descargado del siguiente link: <https://github.com/grbl/grbl>

4.9.3. Software

El software de programa corresponde al conjunto de instrucciones y herramientas para generar una comunicación entre el PC y el hardware mediante el intérprete GRBL1.1.

El software utilizado para desarrollar el proyecto será el OpenBuilds CONTROL v1.0.305, es de código abierto y proporciona todas las herramientas necesarias para el control de la maquina soldadora CNC. En la pantalla principal de su interfaz que se puede observar en la figura 96, cuenta con viñetas principales que dan acceso a la conexión con el hardware, control de inicio y parada de proceso, activar o desactivar cabezal, señal de alarma y parada de emergencia, complementos como Fabber y Caverco que son asistentes de manufactura CAM para procesos en CNC.

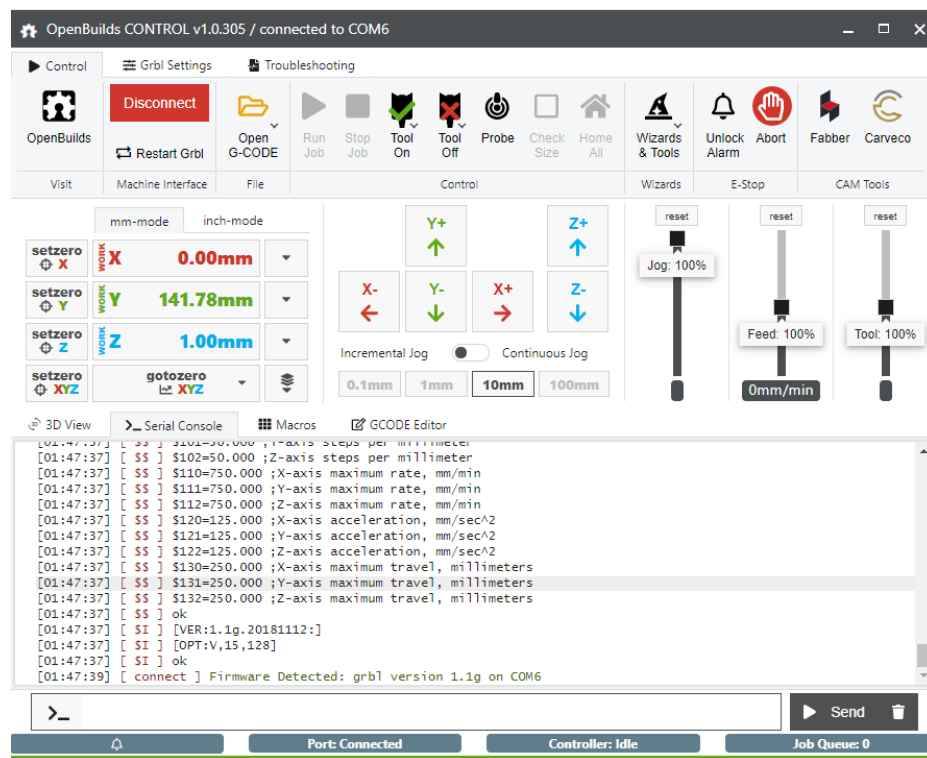


Figura 96. Interfaz del software OpenBuilds CONTROL.

Fuente: Elaboración propia.

Más abajo presenta el menú para control de movimiento en los 3 ejes X, Y, Z con la capacidad de poder manejar cada eje independientemente, saber su posición relativa al

origen y cambiar su origen. Permite cambiar a unidades métricas fácilmente y escoger el modo de movimiento, absoluto o punto a punto. Cuenta con potenciómetros lineales digitales que se encargan de regular los pulsos, avance y velocidad de herramienta.

Finalmente, en la pantalla principal del interfaz aparecen cuatro viñetas las cuales permiten tener una visualización, control y prueba de la trayectoria con herramienta que realizará el cabezal. También cuenta con un editor de código G y una consola que muestra en tiempo real la línea de código que está siendo ejecutada.

En la figura 97 una ventana secundaria del software presenta la amigablemente posibilidad de modificar parámetros importantes para el proceso de soldadura en CNC. Para ello cuenta con un menú donde se presentan los parámetros de tiempo de pulso por paso, pasos por milímetro de cada motor en los distintos ejes y su aceleración en metros por segundo cuadrado, entre otros.

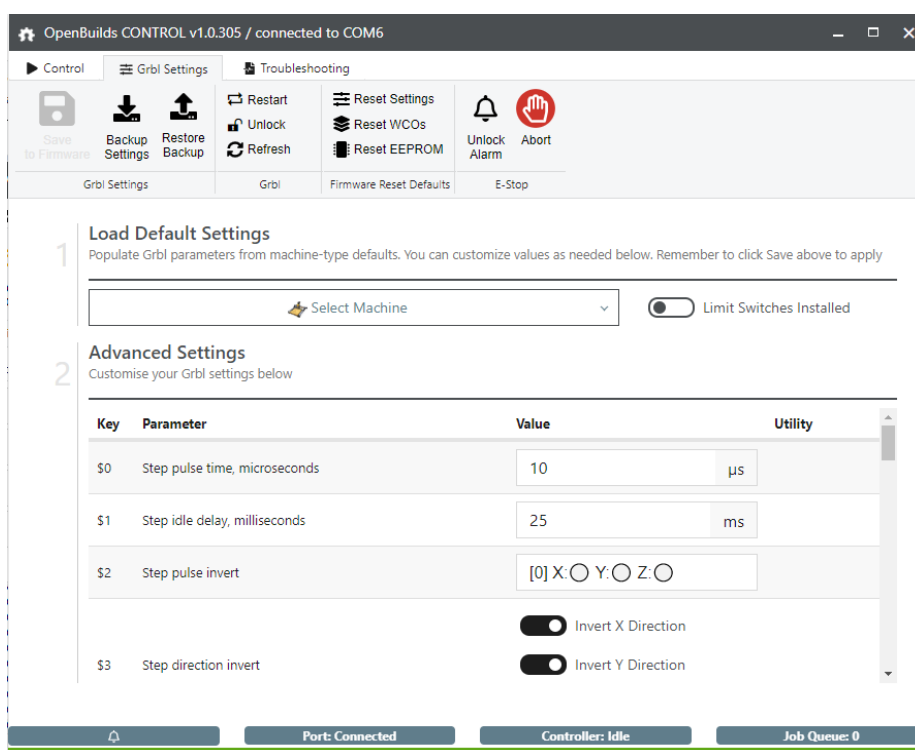


Figura 97. Ventana secundaria del software Openbuilds CONTROL.

Fuente: Elaboración propia.

4.10. Parámetros de soldadura

Los parámetros descritos en la sesión 3.4.3 son atributos del proceso de soldadura que son principalmente configurados manualmente a través de potenciómetros en la tarjeta controladora de la estación de trabajo S3100. Los parámetros serán probados y testeados para encontrar una configuración optima y satisfactoria.

Para mejorar el proceso se utilizará como apoyo la pasta para soldar comercial Indeep de la figura 98 la cual mejorará las condiciones superficiales eliminando óxidos, creará un ambiente estable y seguro para el proceso de soldadura.



Figura 98. Pasta para soldadura con estaño Indeep.

Fuente: Extraída de internet desde <https://www.easy.cl/>

La pasta para soldadura con estaño Indeep tiene color ámbar y es completamente inodora e insoluble al agua. Esta pasta no contiene plomo y garantiza el cicatrizado correcto de las uniones. Está diseñada para su uso mediante cautín en soldaduras de estaño y contiene 100 [g].

4.11. Benchmarking maquinas soldadoras CNC

En el mercado es posible encontrar maquinas CNC comerciales con el mismo propósito que busca este proyecto, sin embargo, a pesar de las ventajas que pueda existir al adquirir un producto nuevo y listo para usar, con este trabajo se ha busca desarrollar algo singular para la comunidad de la universidad, quizás no cuente con elementos sofisticados y de la mejor calidad, pero entrega visiblemente las posibilidades de adaptabilidad de los procesos de manufactura y tecnologías que involucren al CN.

Los componentes necesarios para construir la CNC propuesta en este proyecto se ven con detalle en la tabla 5 en la sección 4.5 y sus costos se pueden ver en la siguiente tabla 6. Todos los componentes fueron comprados en Chile a excepción de la estación de trabajo para soldadura S3100, la cual fue adquirida a través de internet desde China.

Componente	Proveedor	Valor
Kit CNC 3018 Pro	https://www.retroarte3d.cl/	\$ 295.000
Estación Soldadura S3100 Derecho ad valorem 6% IVA 19%	https://www.ebay.com/itm/284452564816#rpdCntId	\$ 111.730
Placa CNC Shield Arduino Uno Drivers A4988	https://www.mcielectronics.cl/	\$ 36.740

Carrete alambre estaño	https://www.mcielectronics.cl/	\$ 9.990
Cables DuPont Tubos termo retráctil Resistencias PCB Estándar	https://makerschile.cl/	\$ 45.200
Pasta soldadura	https://www.easy.cl/	\$ 1.190
Relé	https://www.mcielectronics.cl/	\$ 1.290
Fabricación abrazadera Diseño Impresión	https://www.3dworks.cl/post/cuanto-cuesta-imprimir-en-3d	\$ 47.400
Mano de obra ensamble	Valor estimado considerando un tiempo de trabajo de 3 [hr] a 0,75[UF/hr] (1UF=30.922CLP)	\$ 69.575
Total IVA incluido		\$ 618.115

Tabla 6. Costos de los componentes para la fabricación de la maquina soldadora CNC de este proyecto.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de los sitios web de los proveedores.

Se presentan tres máquinas comerciales provenientes de China con características relativamente similares, pero que se diferencian con la desarrollada en este proyecto específicamente en la cantidad de ejes, ya que las CNC soldadoras comerciales tienen 4 ejes, 3 ejes lineales X, Y, Z y 1 rotativo de 360°. También existe una clara diferencia en el rango de movimiento para el eje Z y potencia suministrada al cabezal.



Figura 99. Soldadora CNC Dongguan Biaoganzhizao Equipment Co., Ltd. Modelo: BG-55441

Fuente: Extraída de internet desde https://bgzz.en.alibaba.com/es_ES/?spm=a2700.wholesale.cordpanyb.2.72407a98DDUI0h



Figura 100. Soldadora CNC Guangdong Xiaowei Intelligent Technology Co., Ltd. Modelo: XW-SS331R

Fuente: Extraída de internet desde

https://xiaoweitech.en.alibaba.com/es_ES/?spm=a2700.details.cordpanyb.2.15d8413fvAlxih



Figura 101. Soldadora CNC Shenzhen Juli Brothers Machinery Co., Ltd. Modelo: JL-H331R

Fuente: Extraída de internet desde

<https://julibrothers.en.alibaba.com/?spm=a2700.details.cordpanyb.2.55b47692lkZuTt>

Características	CNC Comerciales			CNC UTFSM
	Dongguan Biaoganzhizao Equipment Co., Ltd. BG-55441	Guangdong Xiaowei Intelligent Technology Co., Ltd. XW-SS331R	Shenzhen Juli Brothers Machinery Co., Ltd. JL-H331R	Chris Machine 01
Número de ejes	4	4	4	3
Rango eje X [mm]	300	300	300	170
Rango eje Y [mm]	300	300	300	300
Rango eje Z [mm]	100	100	100	40
Rango eje R [°]	360	360	360	-
Velocidad máx. eje X [mm/s]	500	600	500	300
Velocidad máx. eje Y [mm/s]	500	600	500	300

Velocidad máx. eje Z [mm/s]	300	400	300	300
Velocidad máx. eje R [°/s]	300	300	300	-
Potencia cabezal [W]	150	150	150	60
Rango temperatura [°C]	50 - 500	0 - 550	50 - 500	200 - 480
Accionamiento del movimiento	Motor PaP	Motor PaP	Motor PaP	Motor PaP
Mecanismo de alimentación de estaño	Por ruedas dentadas	Por ruedas dentadas	Por ruedas dentadas	Por ruedas dentadas
Rango diámetro de alambre [mm]	0,4 - 1,2	0,6 - 1,2	0,6 - 1,2	0,8 - 1,2
Resolución [mm]	0,01	0,01	0,01	0,01
Lugar de origen	China	China	China	Chile
Precio EXW (CLP)	5.488.471	2.727.084	3.344.537	618.115

Tabla 7. Comparación entre características de las maquinas CNC comerciales y la creada en este proyecto.

Fuente: Elaboración propia a partir de las características obtenidas desde sitio web de sus proveedores.

El costo de fabricación de la maquina soldadora de este proyecto es considerablemente menor. Además, para las maquinas provenientes China hay que asumir ciertos costos de importación del producto, que en esta tabla no se ha considerado.

4.12. Diseño 3D de soldadora CNC

Una vez adquiridos todos los materiales para la construcción de la máquina, se levanta información para el diseño 3D de todos los componentes a través del proceso de ingeniería inversa y el software Autodesk Inventor, ya que los productos comprados vienen con información escasa. La información será necesaria para realizar las modificaciones requeridas para la construcción y ensamblaje de este proyecto.

4.12.1. Diseño estructura soporte

Los componentes estructurales dentro del Kit CNC se dividirán según la mesa o carro de eje al cual le sirvan de estructura soporte.

Para el carro X se tiene la estructura de la figura 102, la cual consta de una base compuesta por dos perfiles de aluminio ranurado en V 20x40x290 [mm] y dos placas de baquelita de 10x45x360 [mm] que sirven como soporte para el carro X y todo su sistema de posicionamiento, por unas de las placas de baquelita se encuentra el rodamiento 608ZZ y sobre la otra placa se encuentran los orificios $\varnothing 3$ [mm] del soporte para acoplar el motor paso a paso. Si bien las guías lineales son consideradas parte del sistema de posicionamiento, no deja de ser importante el vital apoyo estructural que ofrece para un correcto desplazamiento del carro X.

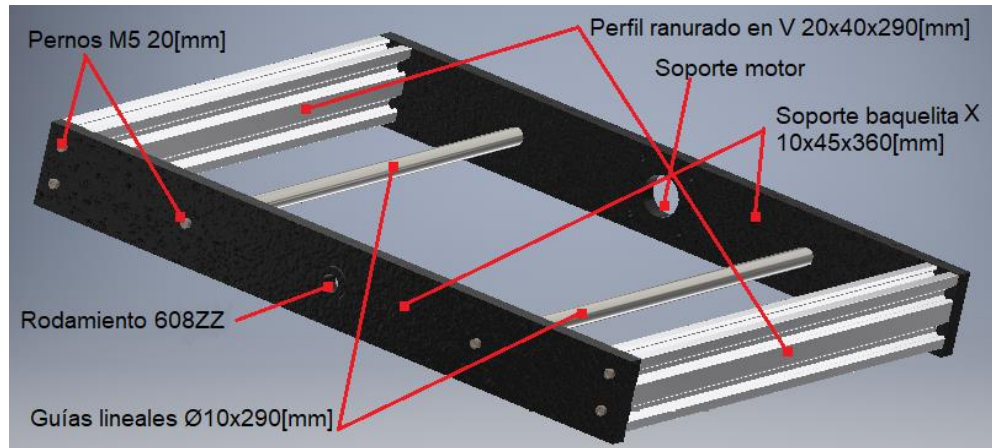


Figura 102. Estructura de soporte X correspondiente al carro X.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Autodesk Inventor.

Por otro lado, el carro Y se desplaza sobre la estructura de la figura 103 que está compuesto por dos placas de baquelita perforadas para ser unidas a través de dos perfiles ranurados en V de 20x20x360 [mm] y dos guías lineales de Ø10x360 [mm] ambos acoplados mediante pernos M5 y M6 respectivamente. También posee el mismo sistema de soporte para el motor paso a paso con orificios para los pernos M3 y el rodamiento de descanso 608ZZ para el eje motriz. Esta estructura es unida a los perfiles de aluminio ranurados de la estructura del soporte X mediante pernos M5 y tuercas T M5. Esta estructura proporciona el soporte para el desplazamiento del carro Y y todo su sistema de posicionamiento.

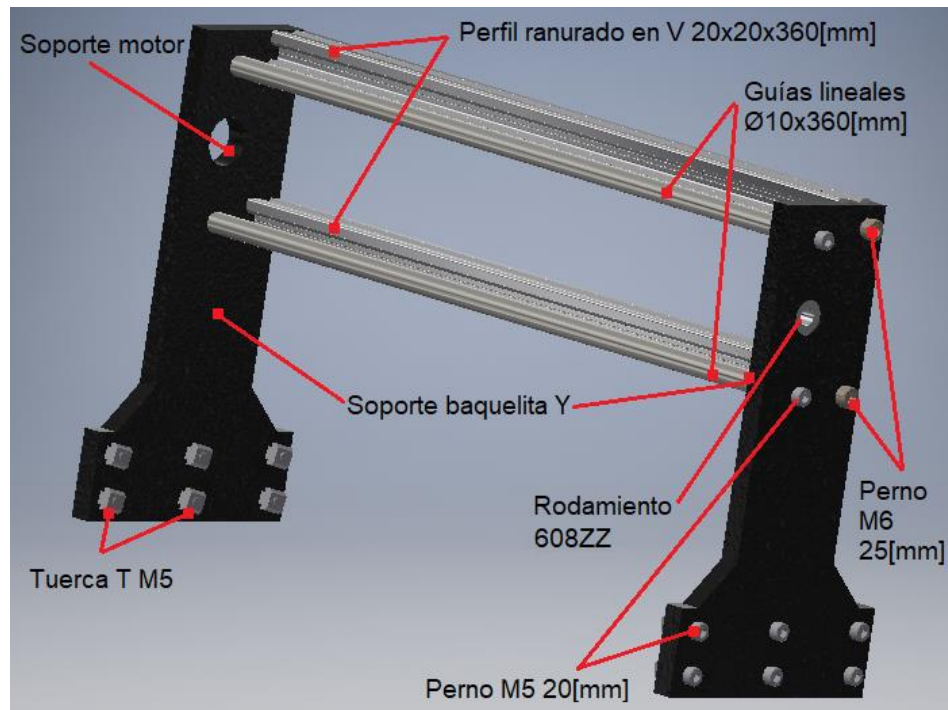


Figura 103. Estructura de soporte Y correspondiente al carro Y.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Autodesk Inventor.

La estructura Z de soporte para el carro Z corresponde igualmente al carro Y descrito en la sección 4.6.1.1. En su estructura cuenta con elementos relacionados al sistema de posicionamiento en el eje Y, mientras que también se encarga de mover el carro Z y su sistema de posicionamiento por todo el eje Y. Cuenta con guías lineales Ø8x85 [mm] que son unidas por pernos M5 y su soporte para el motor paso a paso posee tarugos roscados que son por un extremo acoplados al motor y al otro se encuentra unida a la estructura de soporte Z. Para el descanso del eje motriz Z tiene un rodamiento 608ZZ.

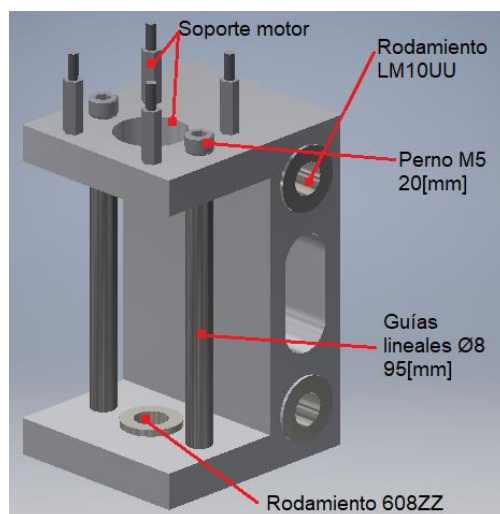


Figura 104. Estructura de soporte Z correspondiente al carro Z.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Autodesk Inventor.

4.12.2. Diseño sistema posicionamiento

El sistema de posicionamiento de los tres ejes consta de guías lineales, eje motriz, motor NEMA17, acople rígido, descanso, rodamientos y tuerca anti backlash. La principal diferencia entre el sistema de posicionamiento de los ejes se encuentra en sus dimensiones y en el acoplamiento del motor paso a paso en el eje Z.

El sistema de posicionamiento del eje X se puede ver en la figura 105 y se encarga controlar el carro X dentro de un rango efectivo de 170 [mm]. El sistema es acoplado dentro de la estructura X descrita en la sección anterior 4.12.1.

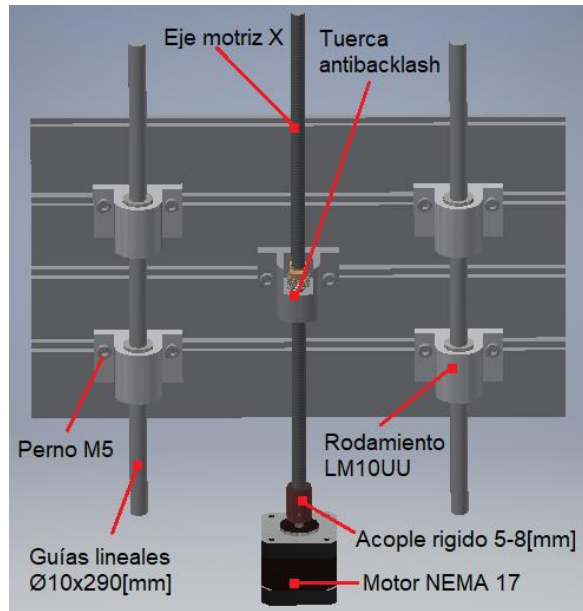


Figura 105. Sistema de posicionamiento para eje X.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Autodesk Inventor.

En el eje Y el sistema de posicionamiento de la figura 106 se encarga de controlar el movimiento del carro Y dentro de un rango efectivo de 300 [mm]. La tuerca antibacklash ocupa el cuerpo del carro Y como sistema de bloqueo para evitar girar. Este sistema es acoplado a la estructura de soporte Y, cabe observar que el sistema de posicionamiento del eje Y se encarga también de mover el sistema de posicionamiento completo del eje Z, el carro Z y cabezal a lo largo de todo el eje Y.

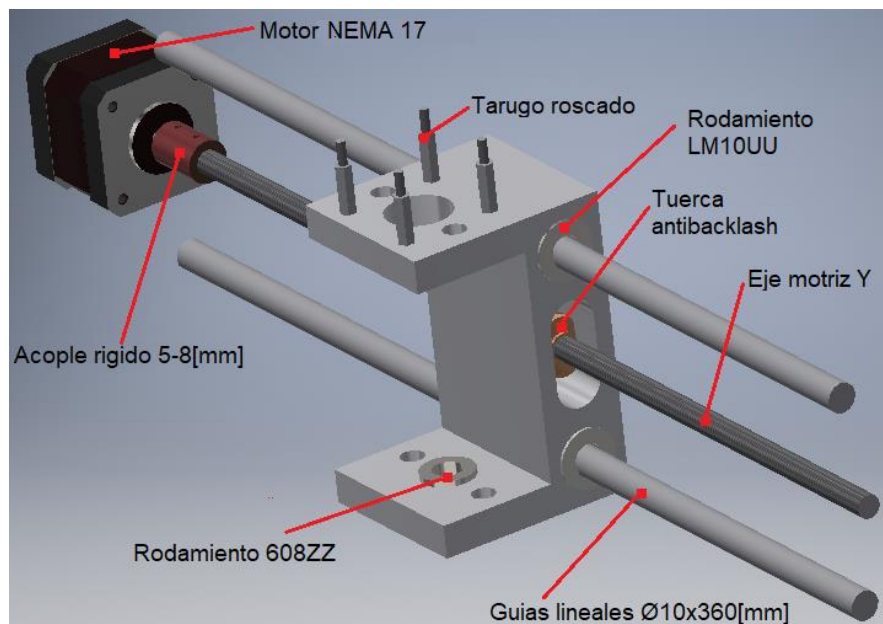


Figura 106. Sistema de posicionamiento para eje Y.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Autodesk Inventor.

Para sistema de posicionamiento en el eje Z de la figura 107 se dispone para el movimiento del carro Z, el cual se encarga de subir y bajar el cabezal soldador. Consta de 4 tarugos verticales de soporte para el motor paso a paso y un rodamiento de descanso 608ZZ para el eje motriz. Otorga un movimiento efectivo en el eje Z de 40 [mm].

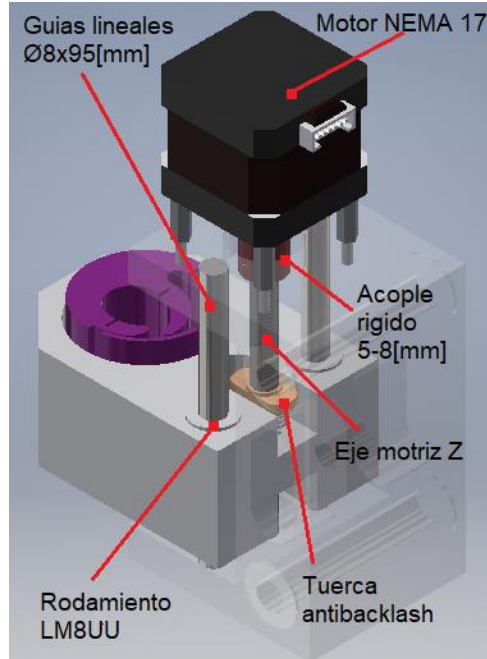


Figura 107. Sistema de posicionamiento eje Z.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Autodesk Inventor.

4.12.3. Diseño mecanismo de alimentación de alambre

Para el sistema de alimentación de estaño se diseñó una unidad de apoyo donde se dispuso el mecanismo de alimentación de alambre sobre el gabinete de PC junto con el eje para el apoyo del carrete de estaño y se puede apreciar en la figura 108. En el frontis del gabinete se dispondrá la tarjeta controladora con los potenciómetros de perillas para tener un control cercano y una visualización inmediata del estado del sistema de alimentación de estaño.

Dentro del gabinete irán conectadas las fuentes de poder, las tarjetas controladoras y relé, saliendo solo del gabinete el enchufe para conectar a la corriente de ambas fuentes de poder, cable USB y los cuatro cables de cada motor, esto con el fin de evitar accidentes y mantener un área de trabajo despejada y segura.

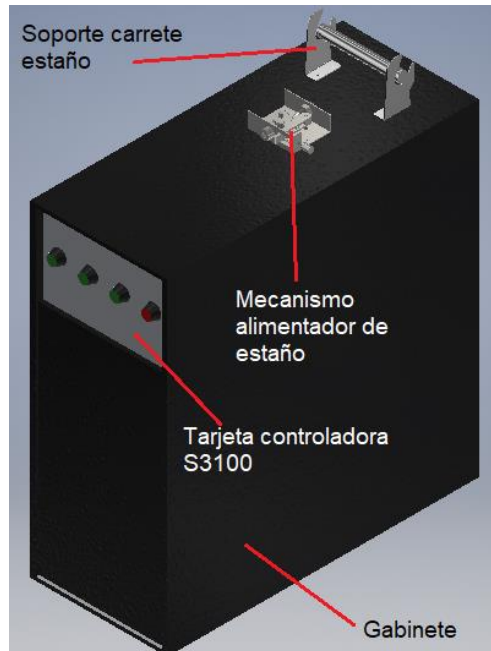


Figura 108. Gabinete adaptado con el sistema de alimentación de estaño.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Autodesk Inventor.

4.13. Diagrama de cuerpo libre de maquina CNC

La máquina CNC de este proyecto corresponde al tipo de máquinas de deposición de materia en la cual el contacto entre el cabezal soldador y la pieza de trabajo es mínimo o casi nulo, a diferencia de las maquinas CNC con porta herramientas, las cuales se ocupan en procesos de remoción de material como en el torneado o fresado, y donde las fuerzas de mecanizado son considerablemente altas.

Debido a que la estructura del kit CNC fue diseñada y fabricada para ser utilizada como router CNC, es que se considera que los elementos mecánicos y estructurales cumplirán sin problemas con lo requerido para el proceso de soldadura que se desea realizar en el proyecto.

Sin embargo, debido a que se modificará parte de la estructura con la abrazadera y cabezal de todas maneras se realizará una confirmación de los parámetros de los motores paso a paso de la CNC.

4.13.1. DLC eje X

En el diagrama de cuerpo libre del sistema de la mesa X se observa en la figura 109 y corresponde a las fuerzas que actuarán durante una operación de soldadura en la maquina CNC. Para poder generar el movimiento que se desea, la potencia del motor paso a paso debe superar la pérdida de carga que sufre debido al roce entre los distintos elementos mecánicos.

Cabe destacar que el eje X está compuesta por el perfil de aluminio y corresponde a la mesa de trabajo de la maquina CNC, donde los distintos elementos para realizar la soldadura se sujetarán. Si bien la placa PCB comercial utilizada en el proyecto tiene una masa de 10[g] con elementos electrónicos incluidos, se sobredimensionará el peso sobre la mesa X con el valor de 5 [Kg] con el objetivo de aumentar las exigencias durante la operación de soldadura.

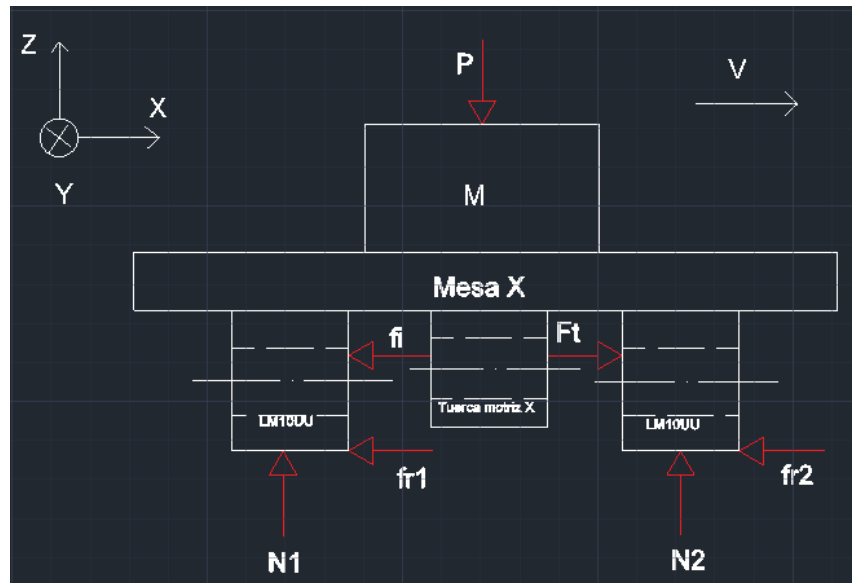


Figura 109. DCL del sistema de posicionamiento eje X

Fuente: Elaboración propia a partir del software AutoCAD.

Las fuerzas involucradas en el DCL son:

- P corresponde al peso total estimado del sistema de posicionamiento. Aquí se incluye el peso de todos los elementos como carro guías lineales, tuerca motriz, placa PCB, elementos electrónicos, perfil de aluminio, pernos, etc.
- Las fuerzas f_{r1} y f_{r2} corresponden a las fuerzas de roce producidas en la superficie de contacto por el deslizamiento de los rodamientos LM10UU y las guías lineales del eje X. Para el eje X hay 4 rodamientos LM10UU simétricamente puestos, 2 por cada guía lineal del eje, como se ve en la sección 4.12.2.
- Las fuerzas N_1 y N_2 corresponden a las reacciones normales en los rodamientos LM10UU debido a la carga que descansa sobre las guías lineales y que es transmitida al rodamiento.
- La fuerza f_i corresponde a la fuerza inercial del sistema de posicionamiento y se produce por la aceleración del sistema en el momento que se inicia el movimiento del carro.
- La fuerza F_t corresponde a la fuerza lineal entre las roscas de la tuerca motriz y el eje motriz, producida por el movimiento axial del sistema de posicionamiento y representa la fuerza necesaria para mover el sistema de posicionamiento.

Teniendo el DCL del sistema de posicionamiento es posible encontrar el torque mínimo requerido por el motor paso a paso para comenzar el movimiento en el eje a través de las siguientes ecuaciones:

$$\sum \text{Fuerzas eje } X = 0 \mid F_t - 2f_{r1} - 2f_{r2} - f_i = 0 \quad (15)$$

$$\sum \text{Fuerzas eje } Z = 0 \mid 2N_1 + 2N_2 - P = 0 \quad (16)$$

Por otro lado, se sabe que las fuerzas de roce producidas en los rodamientos debido al deslizamiento por las guías lineales son iguales al coeficiente de fricción entre ambas superficies multiplicadas por su reacción normal perpendicular a las superficies de contacto, entonces:

$$f_{ri} = \mu \cdot N_i \quad (17)$$

También se sabe que la fuerza inercial del sistema de posicionamiento viene dada por la multiplicación de la masa total en kilogramos y la aceleración a la cual se encuentra sometida esa masa, el motor NEMA 17 está configurado en este proyecto para acelerar a 0,125 [m/s²] en un tiempo máximo de 0,1 [s] hasta alcanzar la velocidad lineal en el eje de 0,00417 [m/s] (250 [mm/min] por seteo). De esta manera se determina según:

$$f_i = m \cdot a \quad (18)$$

Finalmente la fuerza P corresponde a la masa total en kilogramos del sistema multiplicada por 9,81 [m/s²] correspondiente al valor de la aceleración de gravedad de la tierra.

$$P = m \cdot g \quad (19)$$

Ahora si reemplazamos las ecuaciones (16), (17), (18) y (19) en (15) finalmente se tiene que F_t viene dada por la expresión:

$$F_t = \mu \cdot m \cdot g + m \cdot a \quad (20)$$

Conociendo la fuerza que actúa de manera lineal en la superficie de contacto entre las roscas de eje es posible determinar el torque necesario para superar el roce y lograr el desplazamiento de la mesa, el torque necesario T_t se calcula de la siguiente manera:

$$T_t = \frac{F_t \cdot dmT}{2} \left(\frac{l + \pi \cdot \mu \cdot dmT \cdot \sec \theta}{\pi \cdot dmT - \mu \cdot l \cdot \sec \theta} \right) \quad (21)$$

Donde T_t corresponde al torque en newton metros [Nm] producido en el eje debido al roce entre las rosca motriz y eje motriz, F_t es la fuerza lineal ejercida entre las roscas de eje medida en Newton [N], dmT corresponde al diámetro efectivo de rozamiento en metros [m],

l corresponde al avance lineal por vuelta del eje motriz en [m], μ es el coeficiente de roce estático entre las superficies y θ es el ángulo del filete de la rosca en grados [°].

Por otro lado, así como está la existencia de la fuerza inercial para la masa cuando se mueve linealmente, también hay un momento inercial que se produce al acelerar el giro un elemento o masa, en este caso el eje motriz el rodamiento de bolas radial y el rotor del motor paso a paso. De esta manera el momento generado por la aceleración rotacional del sistema viene dada por:

$$\sum T_{li} = I_i \cdot \alpha \quad (22)$$

Donde T_i corresponde al torque generado por el momento inercial en newton metro [Nm], I corresponde a la inercia de cada elemento en rotación en kilogramos por metro cuadrado [kg·m²] y α corresponde a la aceleración angular del eje.

Como el motor NEMA 17 está configurado para mantener una velocidad lineal de 0,00416 [mm/s] es posible obtener su aceleración angular conociendo el avance del eje motriz y el tiempo de aceleración. Si se divide la velocidad lineal por el avance del eje es posible obtener las revoluciones por segundo [RPS] del eje motriz y al dividirla por el tiempo máximo de aceleración del motor es posible obtener la aceleración angular en términos de revoluciones por segundo cuadrado [rev/s²], de esta manera la aceleración angular viene dada por:

$$\alpha = \frac{0,00416}{0,1 \cdot 0,004} = 10,4 \left[\frac{rev}{s^2} \right]$$

$$\alpha = 10,4 \cdot 2 \cdot \pi = 65,35 \left[\frac{rad}{s^2} \right]$$

Una vez conociendo todos los valores se reemplaza en las ecuaciones para ser tabular los resultados en la tabla 8:

Parámetros X							
Masa [kg]	Inercia rotor [kg·m²]	Inercia eje motriz [kg·m²]	Inercia rodamiento 608ZZ [kg·m²]	Ft [N]	Tt [N·m]	Ti [N·m]	Par requerido motor [N·m]
4,0	0,0000034	0,000001	0,0000048	2,03924	0,0030728	0,0006012	0,003674

Tabla 8. Parámetros involucrados en el cálculo del par torsional necesario por el motor paso a paso del eje X.

Fuente: Elaboración propia.

El torque necesario por el motor paso a paso del eje X para accionar el carro X y todo su sistema de posicionamiento tiene un valor de 0,0037 [N·m], lo cual indica que el motor NEMA 17 cumple con el torque necesario para generar movimiento en el eje X.

1.1.1. DCL eje Y

Para el eje Y se tiene el diagrama de cuerpo libre del carro Y, el cual se encarga de moverse a través del eje Y transportando su sistema de posicionamiento y también el del eje Z. La masa estimada de ambos sistemas de posicionamientos y sus componentes se estiman en una masa total de 3 [Kg].

El DCL del carro Y es idéntico al del carro X, con la diferencia que la sumatoria de fuerzas esta vez se realiza en los ejes Z e Y, es por ello que es posible realizar el mismo análisis y cálculos para obtener el torque necesario por el motor paso a paso en el eje Y. Los resultados se muestran en la tabla 9.

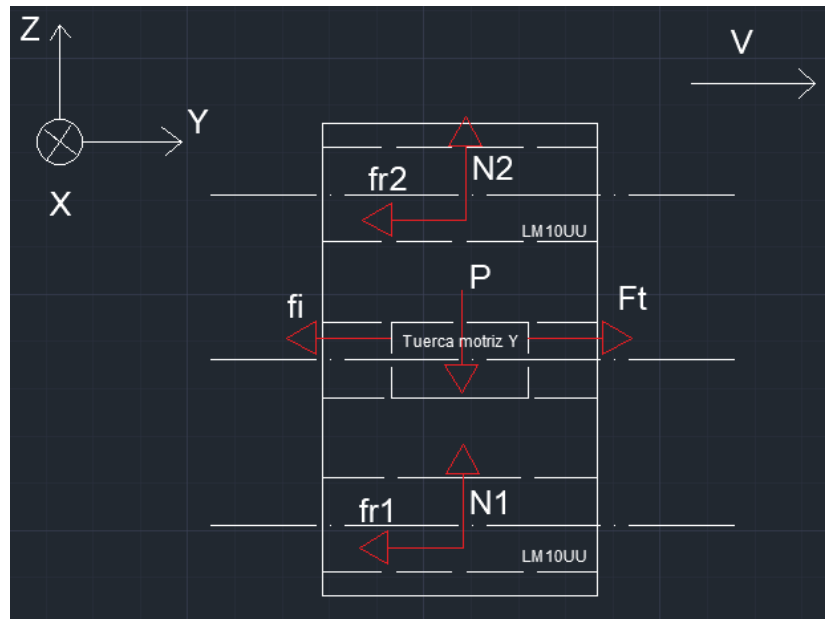


Figura 110. DCL del sistema de posicionamiento eje Y.

Fuente: Elaboración propia a partir del software AutoCAD.

Las fuerzas involucradas en el DCL son:

- P corresponde al peso total estimado del sistema de posicionamiento. Aquí se incluye el peso de todos los elementos como carro, guías lineales, tuerca motriz, placa PCB, elementos electrónicos, perfil de aluminio, pernos, etc.
- Las fuerzas f_{r1} y f_{r2} corresponden a las fuerzas de roce producidas en la superficie de contacto por el deslizamiento de los rodamientos LM10UU y las guías lineales del eje X. Para el eje X hay 4 rodamientos LM10UU

simétricamente puestos, 2 por cada guía lineal del eje, como se ve en la figura X en la sección 4.12.2.

- Las fuerzas N_1 y N_1 corresponden a las reacciones normales en los rodamientos LM10UU debido a la carga que descansa sobre las guías lineales y que es transmitida al rodamiento.
- La fuerza f_i corresponde a la fuerza inercial del sistema de posicionamiento y se produce por la aceleración del sistema en el momento que se inicia el movimiento del carro.
- La fuerza F_t corresponde a la fuerza lineal entre las roscas de la tuerca motriz y el eje motriz, producida por el movimiento axial del sistema de posicionamiento y representa la fuerza necesaria para mover el sistema de posicionamiento.

Parámetros Y							
Masa [kg]	Inercia rotor [kg·m ²]	Inercia eje motriz [kg·m ²]	Inercia rodamiento 608ZZ [kg·m ²]	Ft [N]	Tt [N·m]	Ti [N·m]	Par requerido motor [N·m]
3,0	0,0000034	0,0000012	0,0000048	1,1544300	0,0017395	0,0006143	0,0023538

Tabla 9. Parámetros involucrados en el cálculo del par torsional necesario por el motor paso a paso del eje Y.

Fuente: Elaboración propia.

Dado el valor del par requerido por el motor paso a paso es que se determina que el motor NEMA 17 utilizado en el proyecto cumplirá con los requerimientos para desarrollar el proceso de soldadura de este proyecto.

1.1.2. DCL eje Z

Para el diagrama de cuerpo libre del eje Z se tiene el carro Z con una masa estimada de 2 [kg], constituido por el cabezal soldador, abrazadera, rodamientos, eje y tuerca motriz. El DCL se puede observar en la figura X.

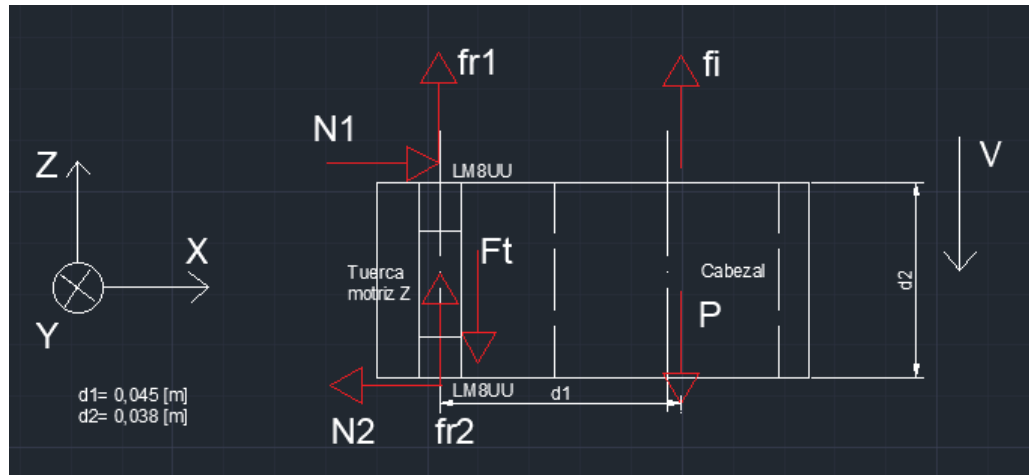


Figura 111. DCL del sistema de posicionamiento eje Z.

Fuente: Elaboración propia a partir del software AutoCAD.

Las fuerzas involucradas en el DCL son:

- P corresponde al peso total estimado del sistema de posicionamiento y cabezal. Aquí se incluye el peso de todos los elementos como carro, guías lineales, tuerca motriz, placa PCB, elementos electrónicos, perfil de aluminio, pernos, etc.
- Las fuerzas f_{r1} y f_{r2} corresponden a las fuerzas de roce producidas en la superficie de contacto por el deslizamiento de los rodamientos LM10UU y las guías lineales del eje X. Para el eje X hay 4 rodamientos LM10UU simétricamente puestos, 2 por cada guía lineal del eje, como se ve en la figura X en la sección 4.12.2.
- Las fuerzas N_1 y N_2 corresponden a las reacciones normales en los rodamientos LM10UU debido a la carga que descansa sobre las guías lineales y que es transmitida al rodamiento.
- Las cotas d_1 y d_2 corresponden a las distancias conocidas necesarias para hacer la sumatoria de momentos.
- La fuerza f_i corresponde a la fuerza inercial del sistema de posicionamiento y se produce por la aceleración del sistema en el momento que se inicia el movimiento del carro.
- La fuerza F_t corresponde a la fuerza lineal entre las roscas de la tuerca motriz y el eje motriz, producida por el movimiento axial del sistema de posicionamiento y representa la fuerza necesaria para mover el sistema de posicionamiento.

Siguiendo el mismo procedimiento que en los DCL anteriores se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\sum \text{Fuerzas eje Z} = 0 \mid f_{r1} + f_{r2} + f_i - F_t - P = 0 \quad (23)$$

$$\sum \text{Fuerzas eje X} = 0 \mid N_1 = N_2 \quad (24)$$

$$\sum \text{Momentos en LM8UU inferior} = 0 \mid N_1 \cdot d_2 - f_i \cdot d_1 + P \cdot d_1 = 0 \quad (25)$$

$$f_{ri} = \mu \cdot N_i \quad (26)$$

Reemplazando (24), (25), (17), (18) y (19) en (23), se tiene que:

$$F_t = m \cdot g - m \cdot a - \frac{2\mu \cdot (m \cdot g - m \cdot a) \cdot d_1}{d_2} \quad (27)$$

De esta manera conociendo el valor de F_t es posible determinar el par requerido por el motor paso a paso en el eje Z al igual que en los otros ejes, los valores obtenidos se pueden ver en la tabla 10.

Parámetros Z							
Masa [kg]	Inercia rotor [kg·m²]	Inercia eje motriz [kg·m²]	Inercia rodamiento 608ZZ [kg·m²]	Ft [N]	Tt [N·m]	Ti [N·m]	Par requerido motor [N·m]
2,0	0,0000034	0,0000003	0,0000048	19,3241237	0,2815302	0,0000016	0,2815318

Tabla 10. Parámetros involucrados en el cálculo del par torsional necesario por el motor paso a paso del eje Z.

Fuente: Elaboración propia.

Dado el par de motor requerido por el motor paso a paso en el eje Z, es que se considera que el motor NEMA17 cumplirá con los parámetros para realizar el proceso de soldadura.

1.2. Esquema eléctrico del circuito de maquina CNC

El esquema eléctrico de la maquina soldadora CNC se puede observar en la figura 112. Cabe señalar que se ha debido utilizar 3 pines para el uso del relé correspondientes a un fin de carrera del eje Z, Groud (Grd) y 5 [V]. Esto se ha hecho debido a que la señal emitida para activar y desactivar la herramienta de corte por parte del software OpenBuilds CONTROL es enviada a través del pin Z+ perteneciente un fin de carrera del eje Z, esto pasa al cargar las librerías (firmware) de herramientas propias del software OpenBuilds CONTROL y ser sobrescritas en las carpetas del firmware GRBL1.1, de esta manera es posible activar y desactivar el relé, utilizando la señal de encendido y apagado de herramienta de corte en el software OpenBuilds CONTROL.

Resulta ventajoso poder automatizar el relé y la activación del motor de 12[V] y con ello el sistema de alimentación de estaño, sin embargo, se ha omitido el uso de sensores de fin de carrera lo cual puede ser problemático en algunas tareas donde no se tenga un conocimiento acabado del trabajo que se desea realizar y de las dimensiones de la máquina.

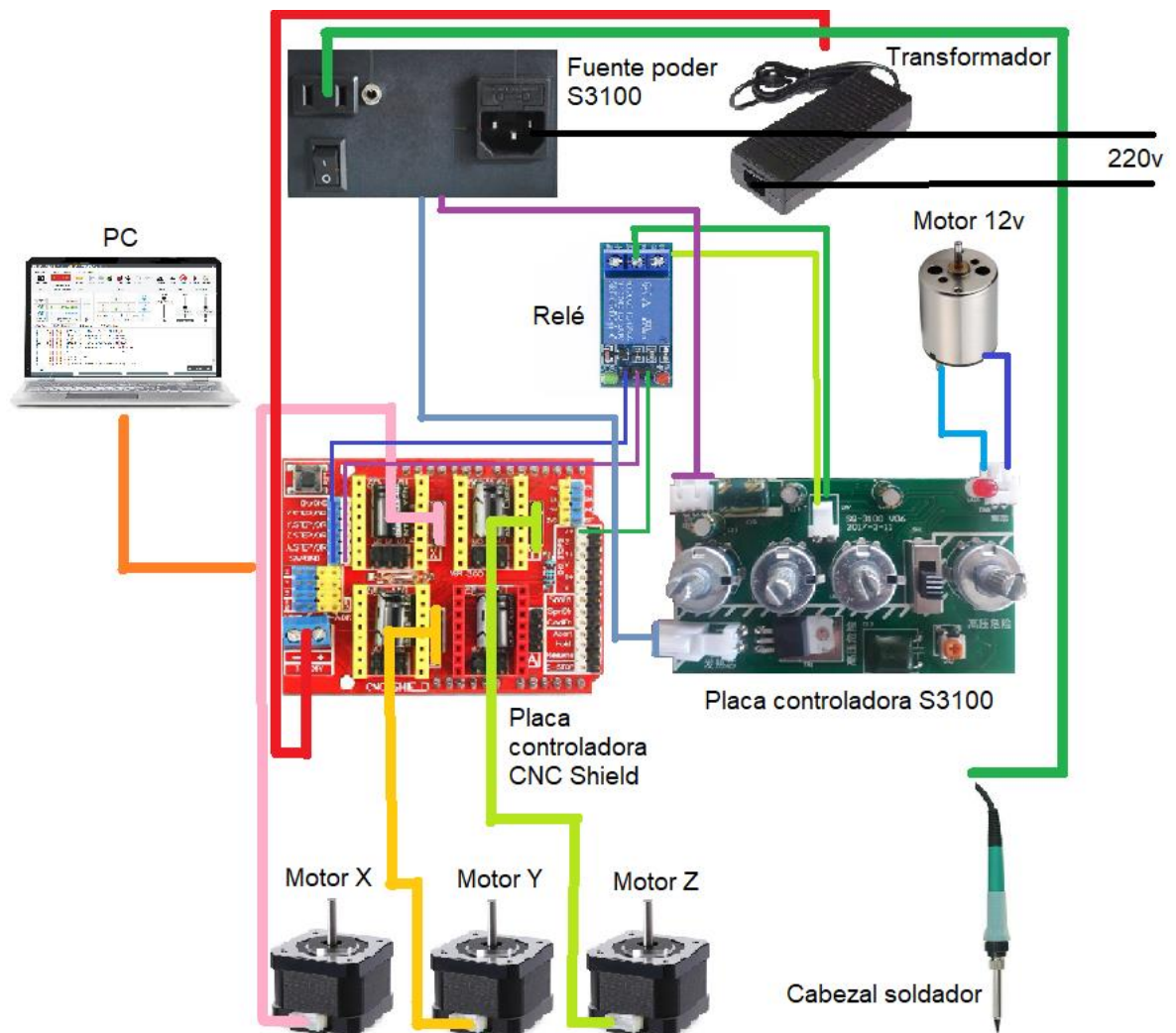


Figura 112. Esquema eléctrico de maquina soldadora CNC.

Fuente: Elaboración propia a partir del uso del software Paint de Windows.

5. Ensamblaje de maquina CNC

El ensamblaje de la maquina requiere herramientas comunes, la cabeza de todos los pernos son de cabeza hexagonal o Allen de medidas M2, M3, M5 Y M6. Por otro lado, el ensamblaje del gabinete solo requiere de destornillador de cruz.

5.1. Estructura y carro X

Esta parte de la maquina está compuesta por la mesa de trabajo o carro X, su sistema de posicionamiento y su estructura de apoyo.

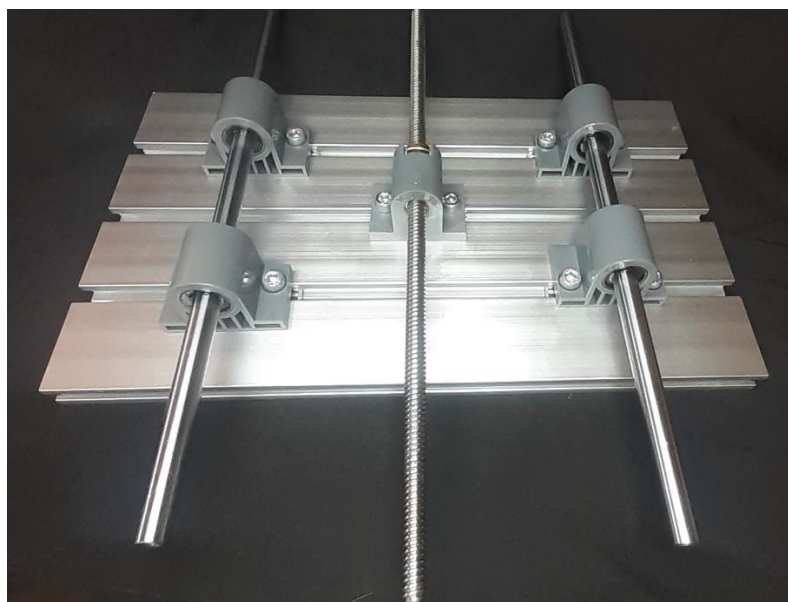


Figura 113. Carro X con su sistema de posicionamiento sin el motor paso a paso.

Fuente: Elaboración propia.

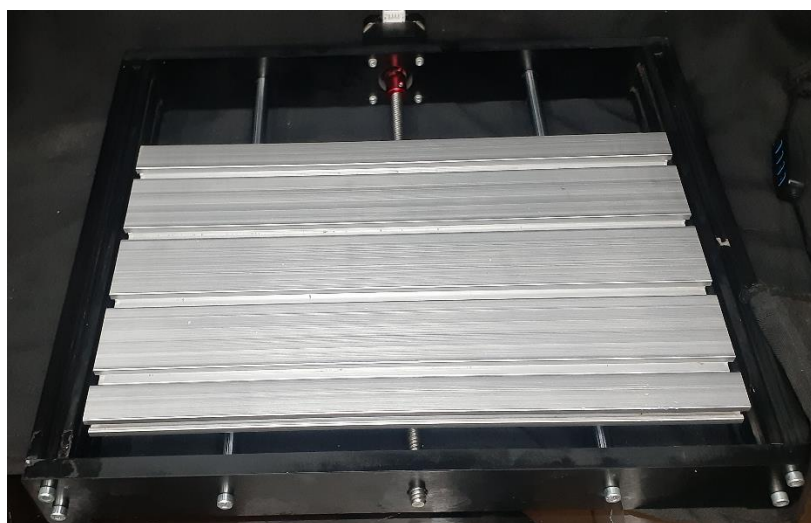


Figura 114. Estructura de apoyo y carro X con su sistema de posicionamiento y motor paso a paso.

Fuente: Elaboración propia.

5.2. Estructura y carro Y

La estructura y carro Y se encargan de sostener y transportar al carro Z con sus componentes. Esta sección de la maquina tiene mayor capacidad de movimiento y está compuesta por su estructura de apoyo, carro y sistema de posicionamiento.

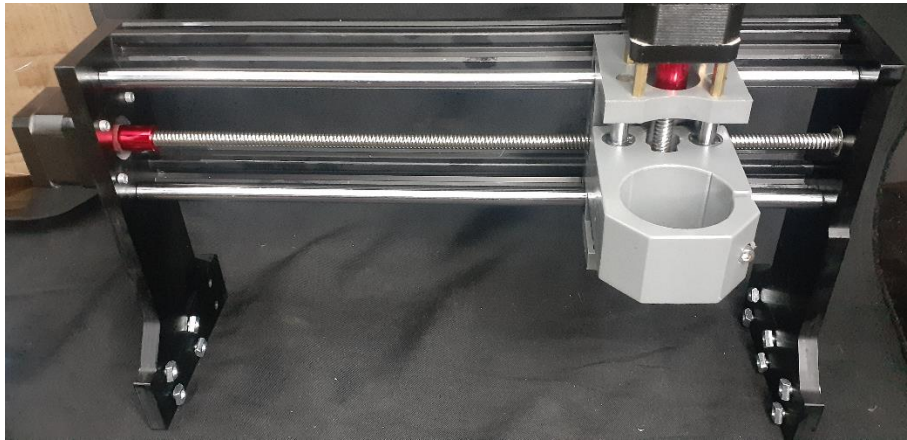


Figura 115. Estructura de apoyo y carro Y con su sistema de posicionamiento y motor paso a paso.

Fuente: Elaboración propia.

5.3. Estructura y carro Z

La estructura Z y carro Z son elementos dentro del kit CNC que vienen ensamblados desde fabrica, existen elementos de sujeción que no se tiene certeza si son roscados, embutidos o adheridos con pegamentos. Sin embargo, dentro de todo el proceso de ensamblaje no se detectó ni juegos mecánicos entre las sujeciones cuestionadas. Cabe señalar que la estructura y carro de este eje son transportados por el carro Y.



Figura 116. Estructura de apoyo y carro Z con su sistema de posicionamiento y motor paso a paso.

Fuente: Elaboración propia.

5.4. Sistema de alimentación de estaño

El sistema de alimentación de estaño se dispuso sobre la superficie superior del gabinete como fue diseñado.

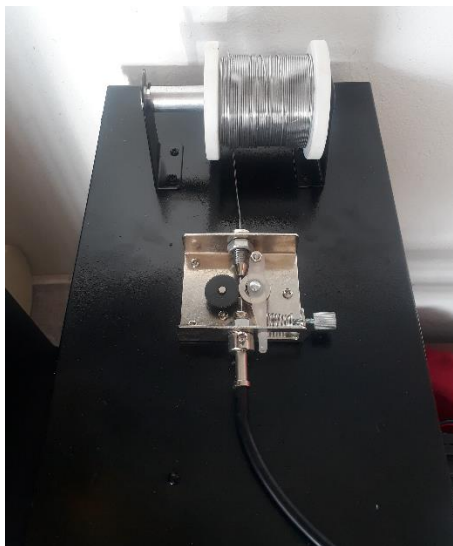


Figura 117. Mecanismo de alimentación de estaño dispuesto sobre el gabinete.

Fuente: Elaboración propia.

5.5. Fabricación de abrazadera

Para la abrazadera se decide crear un molde a partir de los elementos físicos originales y de manera manual. Para ellos los elementos son recubiertos con plástico scotch para luego insertarlo en un cilindro sin tapas también recubierto. Una tapa del cilindro es perforada e insertada a través del cabezal soldador y el conducto guía del alimentador de estaño, para luego sellar y rellenar con silicona líquida. El resultado final de la elaboración manual se puede observar en la figura 118:



Figura 118. Abrazadera hecha manualmente utilizada para acoplar el cabezal soldador al carro Z.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar que la elaboración de este componente es bastante rustica y carece de prolijidad, por lo que es recomendable buscar una forma de fabricación alternativa que garantice un mejor calidad superficial y estética. Sin embargo, el componente tiene buena flexibilidad, la mecánica funciona y ejerce presión sobre el cabezal y conducto guía del alimentador de estaño, por lo que se determina que es apto para seguir desarrollando el proyecto.

5.6. Sistema electrónico y eléctrico

Dentro del gabinete se encuentran distribuidos los elementos del esquema de la figura 119, se dispuso la tarjeta controladora S3100 en una compuerta con bisagras en la parte frontal del gabinete con el fin de que el operador al momento de ajustar los parámetros de soldadura tenga visión del sistema de alimentación y si desea abrir la compuerta tendrá acceso visual a la tarjeta CNC Shield Arduino, relé, motor de 12 [V] y fuentes de poder.

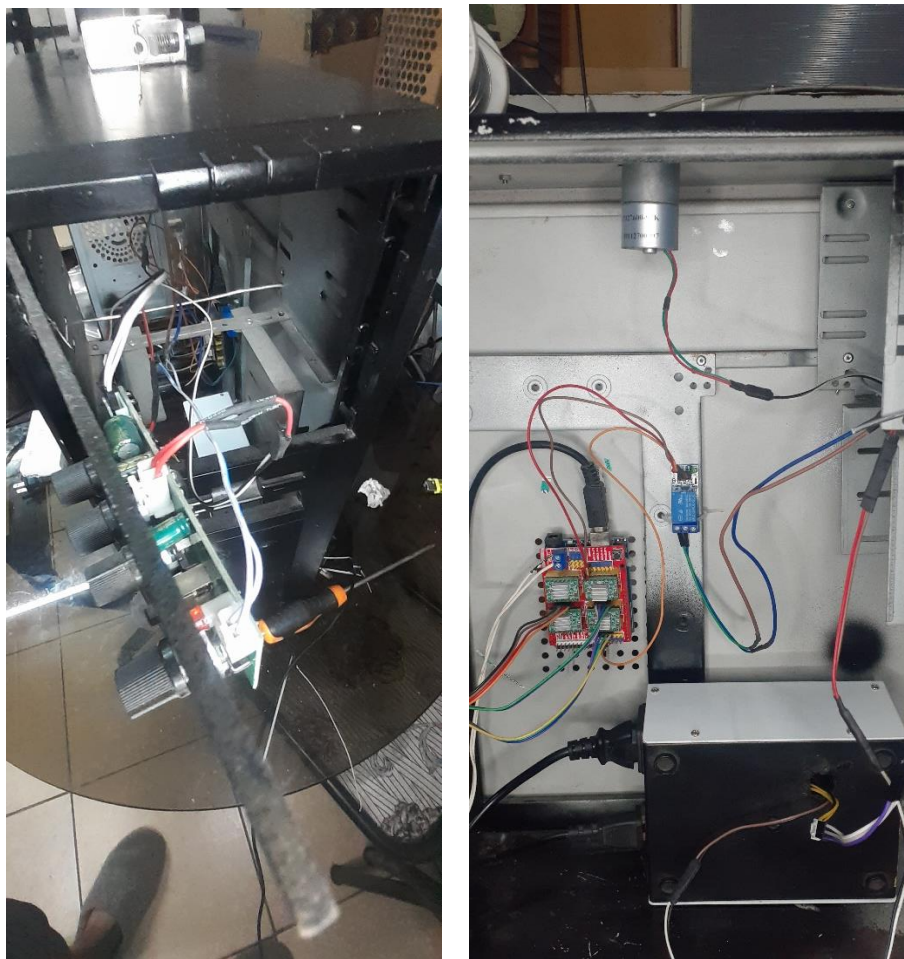


Figura 119. Tarjeta controladora, relé y motor de 12[V] dispuestos dentro del gabinete.

Fuente: Elaboración propia.

5.7. Set up

Finalmente, la configuración final de la CNC se muestra en la figura 120 y se utilizará para realizar las distintas pruebas para conseguir los objetivos de este proyecto. Cabe destacar que se dispuso de una base para el soporte de la estructura de la CNC para que el cable guía que lleva el estaño desde el sistema de alimentación hacia el cabezal soldador, ya que con su longitud no bastaba para el movimiento completo en el eje Y.

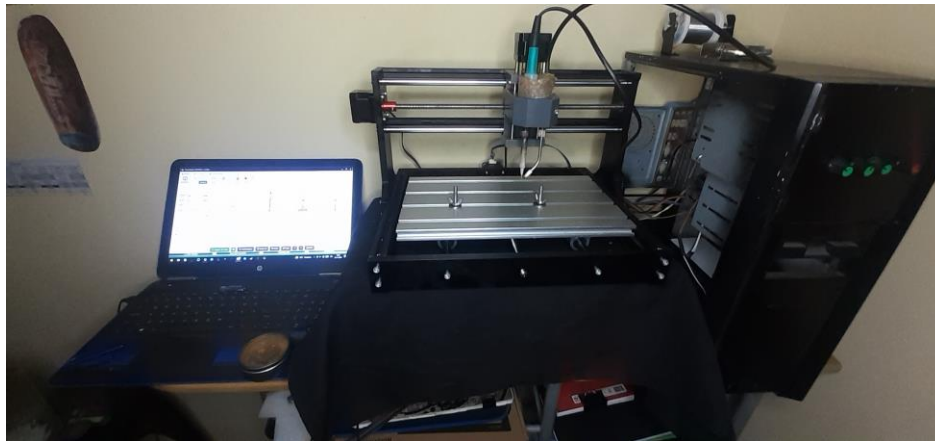


Figura 120. Estructura de apoyo y carro Z con su sistema de posicionamiento y motor paso a paso.

Fuente: Elaboración propia.

6. Puesta en marcha y resultados

Para las pruebas que se describirán a continuación se dispondrá de 1 videos en YouTube que dará constancia a lo aquí expuesto.

El control de los parámetros de soldadura se realizó bajo la siguiente regla, el giro total medido de las perillas de los potenciómetros fue 260 [°], por lo cual se decide dividir en intervalos de 65 [°] para tener un conocimiento aproximado del valor de los parámetros configurados en la tarjeta controladora S3100 según los datos de la tabla 11. Lo cual se puede observar en la siguiente tabla y figura:

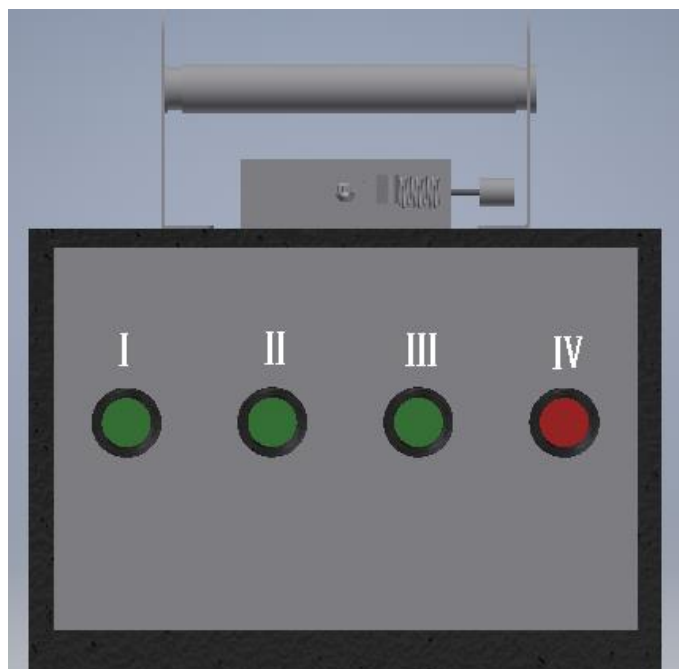


Figura 121. Perillas de la tarjeta controladora S3100 numeradas de izquierda a derecha.

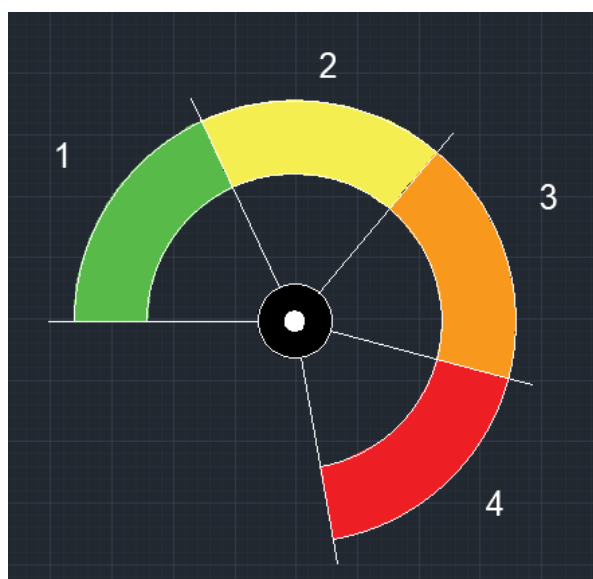


Figura 122. División de niveles según el ángulo de giro del potenciómetro de la tarjeta controladora S3100.

Perilla	Parámetro	Nivel			
		1	2	3	4
I	Tiempo de salida de estaño [s]	0-0,675	0,675-1,350	1,350-2,025	2,025-2,7
II	Tiempo de intervalo de retroceso de alambre [s]	0,0-0,23	0,23-0,45	0,45-0,68	0,68-0,9

III	Velocidad de salida de alambre [mm/s]	2,7-8,8	8,8-14,9	14,9-21	21-27
IV	Rango de control de temperatura [°C]	200-270	270-340	340-410	410-480

Tabla 11. Muestra la división de intervalos realizada para el control de los parámetros de soldadura.

Fuente: Elaboración propia a partir de amazon.com/-/es/Alimentador-automático-soldadura-Electrónico-Soldadura/dp/B07ZVDVTK5.

6.1. Deposición de material

Para la prueba de deposición de material punto a punto se dispuso de una PCB sobre la mesa de trabajo para depositar estaño fundido en los orificios de la placa. Se sujeta a la mesa mediante una prensa de tornillo con golillas en ambos extremos y se procede a la deposición de material.

Se programa un código de pieza básico, que consiste en posicionarse sobre el punto indicado para luego bajar a una velocidad normal programa y luego al acercarse al orificio disminuye su velocidad para detenerse en el orificio y depositar el material, se mantiene 2 [s] sobre el punto para proporcionar calor al punto y asegurar la unión intermolecular entre los metales.

Para la prueba se fue testeando distintas configuraciones de perillas para regular los parámetros del proceso de soldadura, obteniéndose el resultado la figura 122. Se observan acumulaciones de material de formas esféricas y se adhieren puntos adyacentes de la placa mediante el mismo punto de soldadura.

Por otro lado, en algunos orificios se detectan deposiciones satisfactorias en forma y volumen, de las cuales se toman los parámetros para realizar la prueba con un elemento electrónico, en este caso resistencias.

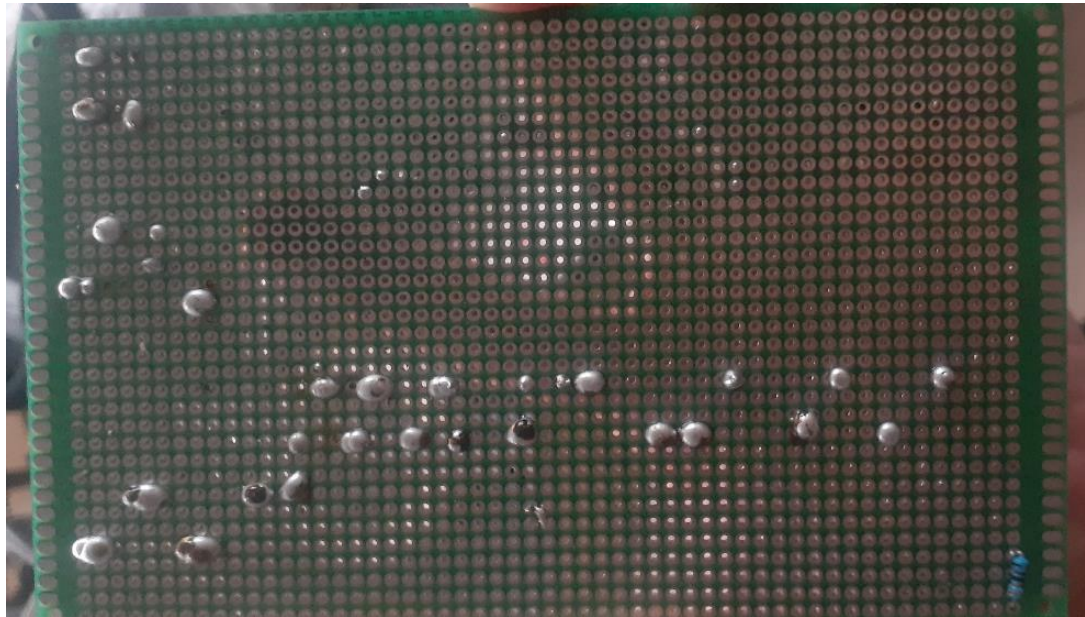


Figura 123. Prueba general de deposición de material en la placa PCB.

Fuente: Elaboración propia.

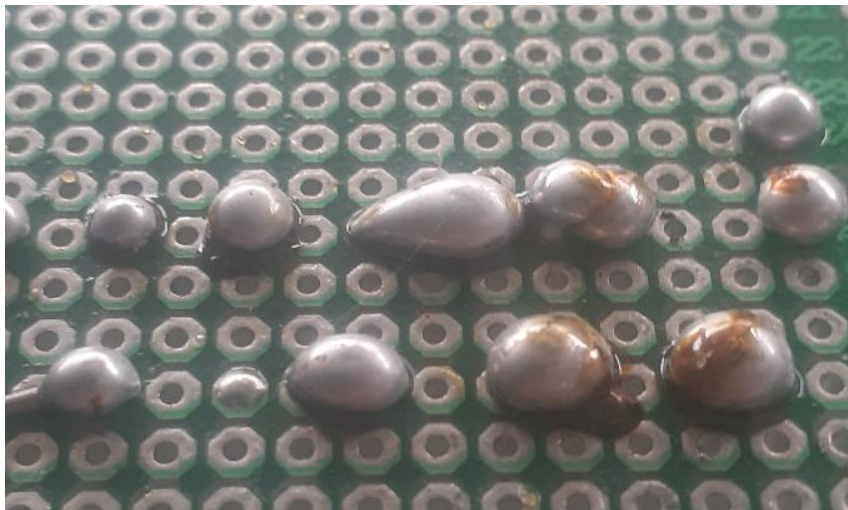


Figura 124. Puntos de soldaduras hechos con distintos parámetros de soldadura.

Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros obtenidos con mejor resultado fueron los siguientes:

Perilla	Nivel
I	3
II	2
III	1

IV	3
----	---

Tabla 12. Configuración optima de los parámetros en la prueba de deposición de material

Fuente: Elaboración propia.

Con los parámetros de la Tabla 12 y un pie de metro se midieron las gotas de material más aceptables de la prueba, obteniéndose gotas de diámetros entre los 1,80 y 2,15 [mm]

6.2. Soldadura por punto de resistencias en PCB

En la prueba de soldadura punto a punto de resistencias se utilizan 37 resistencias estándar THT insertadas a lo largo de una placa PCB. Se dispone sobre la mesa de trabajo la PCB con las resistencias, sobresaliendo sus terminales de unión hacia la punta del cabezal soldador. En la parte posterior de la placa PCB se pone una esponja de polietileno del mismo tamaño que la PCB para sujetar, proteger y evitar el contacto entre la mesa de aluminio y el elemento electrónico.

Las resistencias son separadas entre sí de maneras diferentes para someter la prueba a distintas densidades de componentes electrónicos. Primeramente, se dispuso 8 resistencias separadas a una distancia de 7,62 [mm] con lo cual se obtuvo 7 resistencias soldadas y 6 de manera aceptable, ya que la resistencia dispuesta en la columna G presenta una unión puente en una de sus terminales y en la resistencia de la columna J se detuvo el procedimiento debido a un movimiento no deseado de la placa durante la operación de soldadura, figura 125. Luego se dispuso 10 resistencias separadas 5,08 [mm] donde se obtuvo 7 resistencias soldadas y en 3 se presenta el defecto de unión puente con el orificio vecino en las columnas A, G y K, ver figura 126. Finalmente se pusieron 9 resistencias separadas 2,54 [mm] donde la unión de la resistencia se vio más afectada por la acumulación de material ya que se obtuvieron 0 resistencias satisfactoriamente soldadas, ya que todas presentan uniones puente con las resistencias adyacentes, ver figura 127.

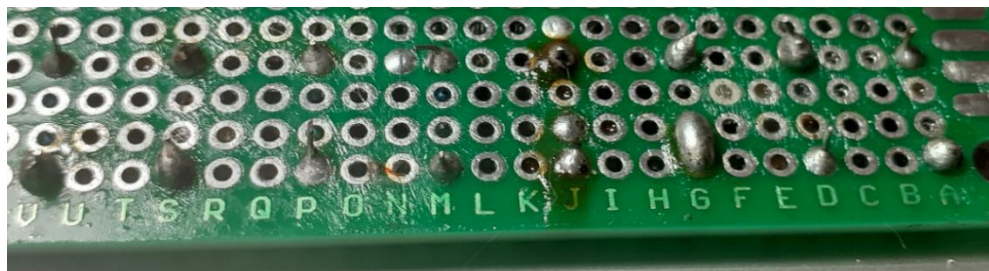


Figura 125. Resultados de prueba de soldadura en resistencias separadas por 7,62 [mm].



Figura 126. Resultados de prueba de soldadura en resistencias separadas por 5,08 [mm].

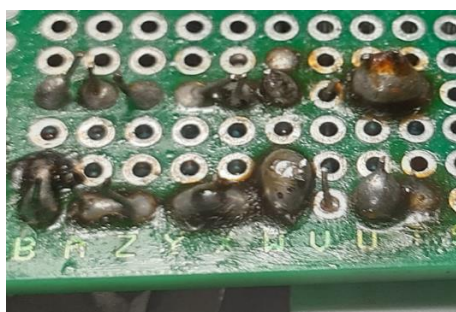


Figura 127. Resultados de prueba de soldadura en resistencias separadas por 2,54 [mm].

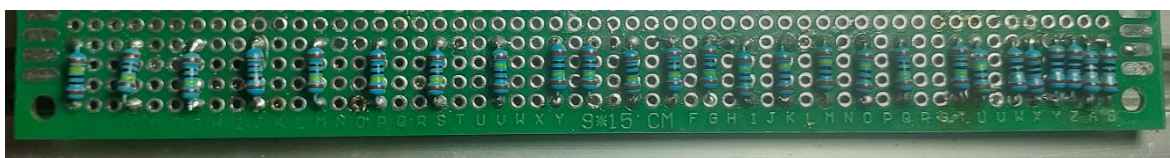


Figura 128. Parte posterior de la PCB y las resistencias soldadas.

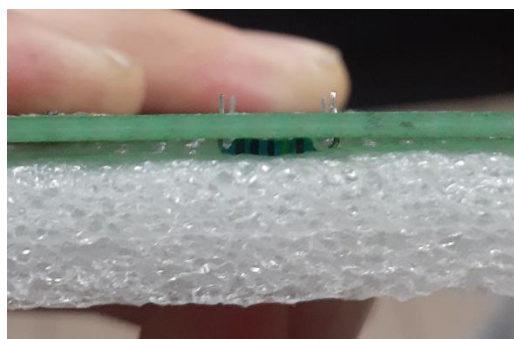


Figura 129. Colocación de la resistencia en la PCB sujeta con la esponja de polietileno.

El programa de pieza consta de un movimiento simple, que consiste en posicionarse sobre el punto indicado para luego bajar a una velocidad normal de 500 [mm/min] y luego al acercarse al orificio, disminuye su velocidad a un valor programado de 300 [mm/min]. Para finalmente detenerse en el orificio y depositar el material, se mantiene 2 [s] sobre el punto para proporcionar calor al punto y asegurar la unión intermolecular entre los metales.

Los resultados se muestran la figura 129 donde se aprecia satisfactoriamente dos puntos de soldadura realizados en las terminales de una resistencia. Sin embargo, se aprecia una diferencia de volumen entre ambos puntos, por lo que se reafirma que existe una pequeña acumulación de material de un punto a otro a pesar de probar distintas configuraciones de los parámetros de soldadura, tiempo de detención y aplicación de flux para aumentar la fluidez. Es recomendable utilizar un motor paso a paso para tener un mayor control del sistema de alimentación de alambre de metal.

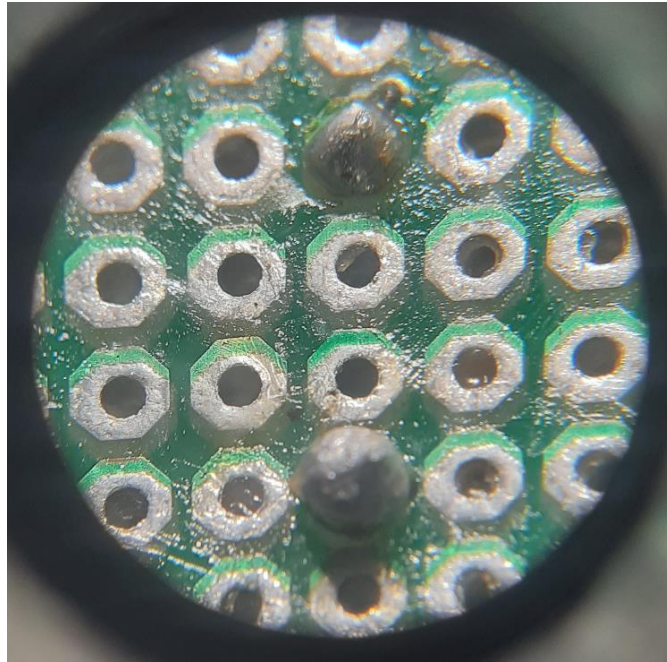


Figura 130. Zoom de los puntos de soldadura en las terminales de una resistencia en la PCB.

Fuente figuras 126 a 130: Elaboración propia.

Los puntos de soldadura más aceptables obtenidos en la terminal de unión las resistencias tienen un diámetro de 2,05 [mm] para la gota superior y 2,30 [mm] para la gota inferior.

6.3. Soldadura continua en láminas de cobre.

Para la prueba de soldadura continua, antes de comenzar el proceso se debe tener en cuenta que el switch de cambio modo punto a punto/modo continuo debe estar en el modo de soldadura continua para esta prueba. Se propone realizar dos pruebas de soldadura en cobre, las cuales corresponde a realizar un cordón continuo entro dos laminas para unir las y realizar un cordón continuo depositando pequeñas porciones de material simulando un movimiento tipo vaivén.

Para la primera prueba se dispuso sobre la mesa de trabajo dos láminas de cobre con un espesor de 0,2[mm] separadas por un espacio aproximado de 0,5[mm]. Se realizaron 3 cordones

modificando el avance del cabezal a 300 [mm/min] y los parámetros de soldadura. Se observa un déficit de potencia por parte de la fuente de poder S3100 ya que en los cordones de soldadura incompletos se observa una fusión incompleta del estaño, esto debido a que el calor del cabezal no solo debe fundir el estaño como en la prueba de soldadura en PCB, sino que también debe proporcionar calor a las láminas de metal para generar la unión. Es por esto que se observa en las láminas de metal una unión intermolecular como se produce en el cobre de las placas PCB y el estaño depositado. Las configuraciones que se utilizaron en cada intento de soldadura se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Intento					
1		2		3	
Perilla	Nivel	Perilla	Nivel	Perilla	Nivel
I	2	I	3	I	2
II	1	II	2	II	1
III	2	III	3	III	1
IV	2	IV	3	IV	4

Tabla 13. Configuración de los parámetros en los intentos de soldadura continua en la placa controladora S3100.

Los resultados de la soldadura continua en láminas de cobre se pueden observar en la figura 131. El cordón obtenido más aceptable correspondiente al tercer intento realizado con la maquina soldadora CNC, tienen un ancho aproximado de 1,75 [mm] en las láminas de cobre.

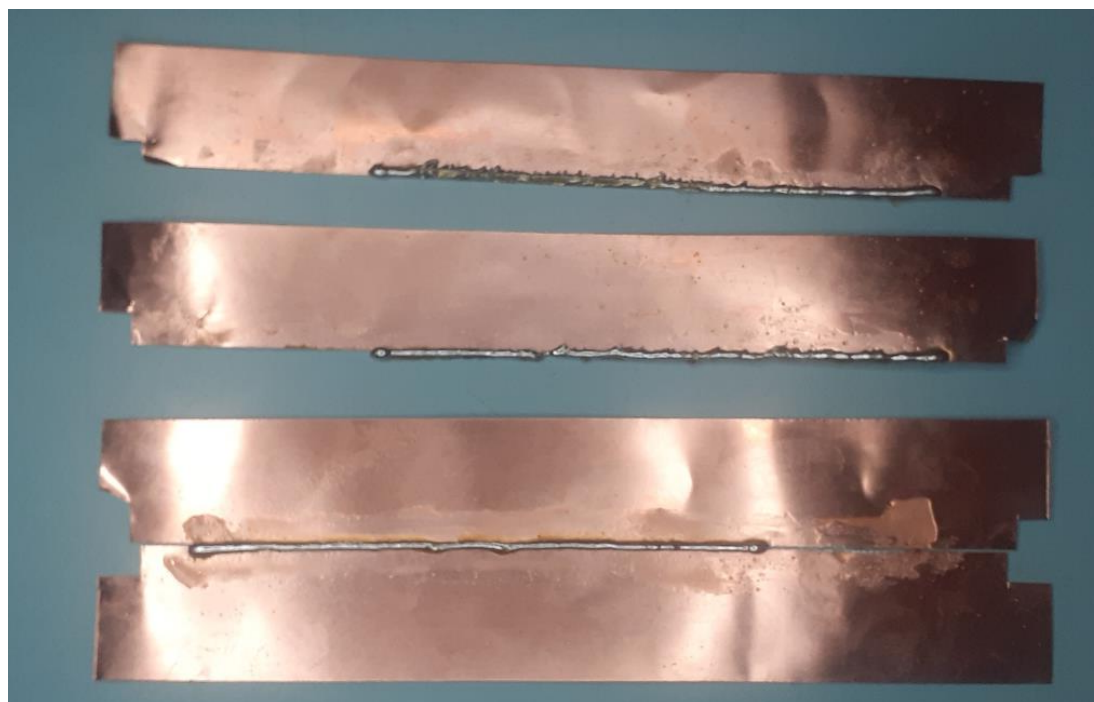


Figura 131. Resultado del proceso de soldadura para la unión de dos láminas de cobre con estaño.

Fuente: Elaboración propia.

Para la segunda prueba se dispuso de las mismas láminas de cobre sobre la mesa de trabajo y se procedió a realizar distintos cordones para simular un movimiento tipo vaivén, todas estas pruebas se pueden observar en la figura 132 donde en algunos intentos se logró formar una soldadura continua y achatada tipo piscina.

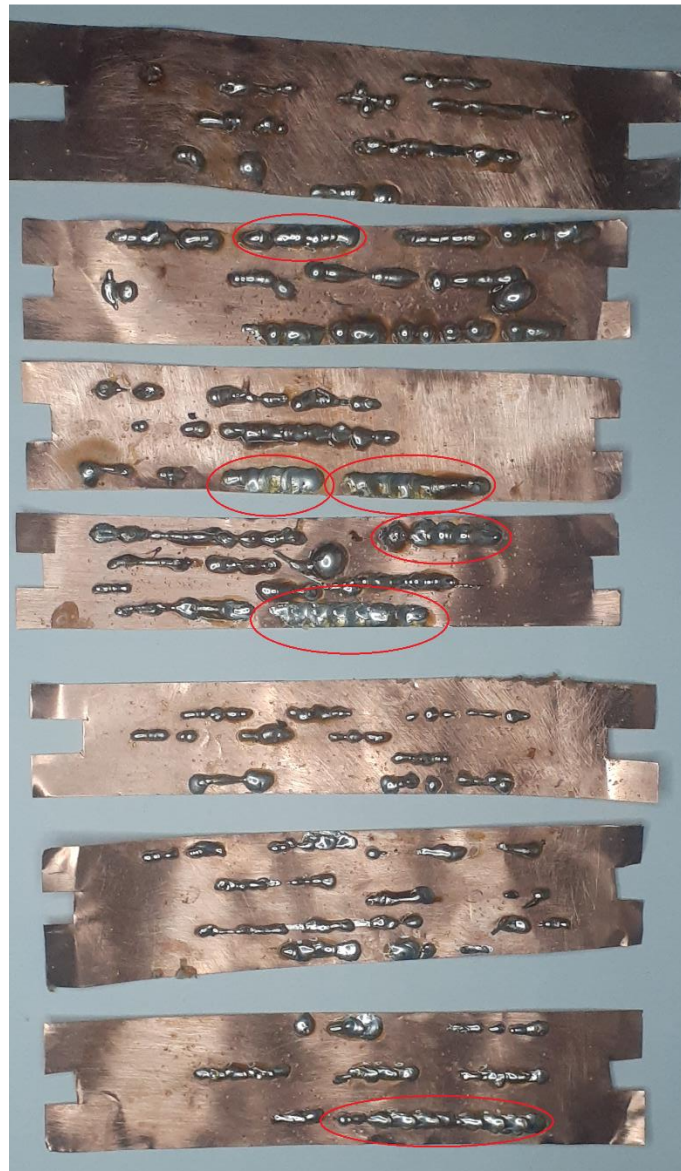


Figura 132. Resultado del proceso de soldadura con el movimiento vaivén sobre láminas de cobre.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados más aceptables se obtienen a velocidades de avance entre 300 [mm/min] y 400 [mm/min] durante la deposición y se logra realizando pequeñas detenciones y retrocesos en el recorrido de la deposición de material logrando una distribución del calor más homogénea. Con la información obtenida en las pruebas se dispone a realizar cordones en una lámina de cobre lijada y limpiada con alcohol, obteniéndose los cordones de soldadura de la figura 133.



Figura 133. Resultado de los cordones de soldadura obtenidos realizando movimientos de vaivén.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que después del lijado es difícil lograr una rectitud completa de la lámina, aun teniendo cuidado en la manipulación, al ser sujeta a la mesa de trabajo debido a la presión que ejercen sobre ellas las prensas de ajuste, sufre pequeñas deformaciones que provocan ciertas discontinuidades durante la deposición de material.

En la figura 134 se puede observar distintas perspectivas y con mayor detalle los cordones obtenidos en la figura 133. Se aprecia una acumulación de material a medida que se avanza en el proceso de soldadura ya que el cordón aumenta su ancho a lo largo del recorrido. También se observa pequeñas crestas de material posicionadas en el lugar donde se produce la alimentación de estaño antes de comenzar el movimiento.

Para tener una medición del cordón se realizan tres mediciones con pie de metro en 3 secciones a lo largo del cordón de soldadura y se saca un promedio, obteniéndose anchos aproximados de 4,25 [mm], 3,35 [mm] y 3,65 [mm] para los cordones de la figura 132 en orden descendente respectivamente.

Dado el resultado de las pruebas es que se considera a la máquina soldadora CNC es apta para soldar componentes del tipo THT, SMD y hacer cordones de soldadura en cobre.



Figura 134. Resultados más aceptables del proceso de soldadura realizando cordones con movimiento de vaivén.

Fuente: Elaboración propia.

7. Conclusiones

Par finalizar el proyecto se expondrá una serie de reflexiones relacionadas con trabajado en este documento, incluyendo apreciaciones respecto a los objetivos cumplidos, falencias y futuras mejoras que se puedan desarrollar e investigar relacionadas al mundo del CNC.

7.1. Tecnologías del proceso de soldadura por maquinas CNC

La soldadura se ha desarrollado históricamente de manera manual, sin embargo, en los últimos años, el desarrollo tecnológico ha impulsado la incorporación de distintos procesos automatizados en la industria de la manufactura, una de ellas corresponde a los procesos de adición de material como la soldadura.

Uno de los principales métodos de empleo del material de aporte en la soldadura es el alambre o hilo de metal junto con las varillas o electrodos. Es por esto que el mecanismo de alimentación del material de aporte para el proceso de soldadura es esencial para asegurar una fluidez del material hacia el caudín y sobre la pieza de trabajo. El uso de las ruedas dentadas resulta la opción más económica y viable para el desarrollo del proyecto permitiendo una deposición de material punto a punto y de manera continua.

Las placas PCB corresponden a un elemento electrónico universal e indispensable para el uso y funcionamiento de cualquier aparato tecnológico de la actualidad. Siendo también futuras fuentes de materia prima, gracias a los metales preciosos con las que son fabricadas y que son cada vez más demandados, siendo cada vez más difícil extraer los minerales de la tierra debido a la sobreexplotación. Es por esto que urge nuevas formas de procesar los productos y repensar el ciclo de vida de los productos, por lo que, si bien este proyecto busca insertar elementos y producir PCBs para su uso, también es importante plantearse la posible automatización del proceso de extracción de componentes y recuperación de materias primas desde la una PCB.

Los procesos de automatización por CNC han significado un gran aporte a industria proporcionando rapidez de respuesta y flexibilidades de producción, generando un gran desarrollo. También ha hecho aportes importantes a la seguridad e integridad física de las personas involucradas en el manejo de equipos y herramientas disminuyendo significativamente la cantidad de accidentes. Pero, por otro lado, existen efectos negativos para el medio ambiente como la generación descontrolada de desechos y residuos industriales, y efectos sociales para el humano como el desempleo y la obsolescencia del conocimiento.

Sin duda este trabajo ayudará a mis futuros colegas a un mejor entendimiento de la adaptabilidad de procesos y el uso de tecnologías de CNC para el desarrollo de nuevas formas de implementar la automatización para nuestra conveniencia como seres humanos. Por otro lado, tendrán la posibilidad de observar y manipular todos los procesos manuales estudiados en los de ramos de Taller I y II automatizados, lo que complementará aún más el aprendizaje y competencias durante el desarrollo del Ingeniero Civil Mecánico de la UTFSM.

7.2. Componentes estructurales, mecánicos y electrónicos para la construcción de la CNC.

Debido al cierre del comercio y fronteras a causa del contexto de pandemia en que se desarrolló el proyecto, se hizo difícil poder adquirir los materiales necesarios para la construcción de la maquina soldadora CNC. Sin embargo, se tuvo contacto con una pyme de dos hermanos llamado, Retroarte 3D que importaba productos desde China, ya que uno de los hermanos vivía en China y mandaba los productos a el otro hermano en Chile. Así fue como se adquirió el Kit Pro CNC 3018 el cual contaba con los motores paso a paso, guías lineales, eje y tuerca motriz, soportes estructurales, etc. Diseñado para desempeñarse como router CNC, el kit cuenta con un armazón robusto y sujeciones firmes, por lo cual presenta condiciones favorables para desarrollar este proyecto, ya que no se generan fuerzas de mecanizado, es que se considera que el Kit Pro CNC

3018 proporciona materiales y componentes aceptables para cumplir con los objetivos del proyecto.

Para el sistema de alimentación de estaño se adquirió a través de internet una estación manual de trabajo de soldadura la cual cuenta con un pedal que acciona la salida del material y que permite la utilización de ambas manos durante el proceso de soldadura. Este producto cuenta con un cabezal soldador, sistema de alimentación por ruedas dentadas, soporte de carrete para el alambre de estaño, conducto guía para el alambre, fuente de poder y una tarjeta controladora encargada de configurar y comandar los parámetros de tiempo de intervalo de salida de estaño en segundos, tiempo de intervalo de retroceso de alambre en segundos, velocidad de salida de alambre en milímetros por minuto y la temperatura del cabezal en grados Celsius.

Para controlar la maquina soldadora CNC y los motores paso a paso, se utiliza una placa de Arduino Uno junto con un módulo de Arduino llamado CNC Shield, que proporciona una manera fácil y económica de automatizar los motores paso a paso. El driver controlador Papolu A4988 es el encargado de comandar a través del módulo CNC Shield los 3 motores dispuesto en cada eje.

Se dispone de un relé para la automatización del pedal de la estación de soldadura, que se alimenta directamente desde la placa CNC Shield de Arduino, alimentándose de los pines GRD, 5VVD y recibiendo señal desde Z+. Una de las consecuencias de utilizar el relé es que se pierde la posibilidad de utilizar finales de carrera ya que uno de los pines es utilizado para el accionamiento del sistema de alimentación de estaño. Esto puede resultar una desventaja al momento de ser utilizada por una persona que desconoce las dimensiones de la máquina.

Comercialmente existen maquinas CNC que cumplen el mismo propósito que este proyecto, que contienen otro tipo de características y que conviene contrastar para tener conocimiento de las capacidades de las maquinas del mercado y la resultante de este proyecto. Al realizar la comparación se concluye que la maquina CNC expuesta en este documento, presenta un costo significativamente menor en comparación a las maquinas comerciales, sin embargo, las maquinas comerciales cuentan con un cuarto eje y una mayor potencia calorífica para el cabezal, lo cual proporciona una gama más amplia de aplicaciones más complejas para la maquina soldadora CNC comercial. La máquina CNC a través de los componentes expuestos, resulta una opción viable para cualquier estudiante o persona que quiera iniciarse y acercarse al mundo de la programación y procesos de soldadura por CNC.

7.3. Diseño de maquina soldadora CNC y adaptación de componentes

Para el diseño de la máquina soldadora CNC se hizo un proceso de ingeniería inversa con cada uno de los componentes de la máquina para tener conocimiento de las dimensiones y conexiones posibles que se pudiesen lograr con los materiales a disposición. Es por ello que se realiza un modelamiento 3D de la maquina soldadora a través del software Autodesk Inventor. Debido a que los componentes corresponden a productos de distintos proveedores es que no existe una compatibilidad definida, por lo cual se fue probando distintas configuraciones en el

modelamiento 3D con el fin de lograr el mejor desempeño e interacción entre todos los componentes de la maquina CNC.

Se dispuso dentro un gabinete de PC todo el sistema eléctrico y electrónico, dejando a la vista el sistema de alimentación de alambre en la superficie superior del gabinete, donde se aprecia y monitorea la salida del alambre de estaño, y también las perillas de control en la parte frontal del gabinete para la modificación expedita de los parámetros de soldadura de la placa de la estación de trabajo de soldadura S3100.

Para un correcto apriete del cabezal soldador en el carro Z de la máquina soldadora CNC, se diseñó y fabrico de manera manual una abrazadera que fuese capaz de ejercer presión sobre ambos ejes del cabezal, correspondiente al conducto guía y al cabezal soldador. El modelo cumple su función, sin embargo, cuenta con poca calidad superficial y carece prolijidad, es por ello que se plantea mejorar el material y proceso de fabricación de la abrazadera a partir del modelo CAD e impresión 3D.

Debido a la longitud del conducto guía del alambre de estaño es que se dispuso de una base de soporte de apoyo para la maquina soldadora CNC para que pudiese llegar a todo el alcance efectivo de la máquina, lográndose tener en los 3 ejes la disposición completa de la deposición de material de estaño.

A pesar de considerar que la estructura y componentes soportarán las cargas generadas por el proceso de soldadura, se decide realizar un breve análisis de las fuerzas involucradas durante la ejecución de un programa de pieza. Debido a que se realizan modificaciones y se agregan componentes que no estaban considerados en el diseño original del Kit Pro CNC 3018 es que se decide realizar el análisis para tener conocimiento del par requerido por los motores paso a paso en cada eje motriz. Una vez estudiado los tres ejes del sistema de posicionamiento se determina que el eje sometido a mayores esfuerzos corresponde al eje Z y se produce debido al esfuerzo de flexión generado debido a la carga del cabezal en el carro Z. A pesar de las exigencias de la nueva configuración de la CNC, los motores paso a paso NEMA 17 están dentro del rango aceptable de torque requerido para accionar y mover los carros y cargas de los 3 ejes.

7.4. Ensamblaje y construcción de maquina soldadora CNC

El ensamblaje de los componentes dentro del kit CNC viene con todas las herramientas y elementos de sujeción para proporcionar un soporte fijo y robusto para el proceso de soldadura. Se requiere tener especial cuidado en dedicarse a alinear los ejes y guías en cada soporte de estructura, lograr una perpendicularidad y rectitud aceptable, se recomienda contar con las herramientas de escuadra o reloj comparador de caratula. El carro Y que ya ensamblado con los elementos del sistema de posicionamiento y carro Z no presenta complicaciones durante el ensamblado, además, durante el levantamiento de información se examinó con detención cada componente asegurando la integridad de la unidad.

La abrazadera diseñada y fabricada a partir de silicona encaja y aprieta los elementos del cabezal soldador, proporciona rigidez al cabezal y soporte de manera satisfactoria al cable guía del alambre de estaño. Cabe insistir que se puede mejorar su fabricación, debido a que todo el proceso fue de manera manual y con escasas herramientas a disposición para su fabricación.

El gabinete como unidad de apoyo fue de bastante utilidad ya que proporciona soporte para el sistema de alimentación de alambre de estaño y de resguardo para los elementos eléctricos y electrónicos. Para los elementos mecánicos del sistema de alimentación de estaño, pertenecientes a la estación de trabajo de soldadura S3100, se mantuvieron distribución espacial original y se montó sobre la superficie superior del gabinete proporcionando al operador visión inmediata del estado del sistema de alimentación de alambre de metal, por otro lado la tarjeta controladora, perteneciente también a la estación de trabajo S3100, se puso en la parte frontal del gabinete sobre una compuerta de bisagra en el espaciado de CD-ROM del gabinete con lo cual el operador puede monitorear y modificar manualmente los parámetros de soldadura. Los demás elementos eléctricos y electrónicos se disponen dentro del gabinete sujetos por abrazaderas plásticas a la estructura del gabinete. De la parte posterior solo salen los cables de los 3 motores paso a paso, fuentes de poder y cable USB.

7.5. Proceso de soldadura utilizando maquina soldadora CNC

Al realizar las distintas pruebas para conocer las capacidades de la maquina soldadora CNC se fue configurando al tanteo las configuraciones de perillas y de avance que fuesen los más óptimas para el resultado requerido en cada prueba.

Para la primera prueba de soldadura de deposición de material sobre una PCB se obtuvieron distintas formas y volúmenes de gota de estaño, de esto se escogió la configuración óptima para depositar una gota de material basado en las posiciones de las perillas, en la forma y tamaño de las gotas, de lo cual se obtuvieron gotas de material de entre 1,80 y 2,15 [mm].

Para la segunda prueba de soldadura punto a punto de una resistencia THT en una PCB se utilizaron los parámetros escogidos en la primera prueba con la cual se obtuvieron puntos aceptables de soldadura de un diámetro aproximado de 2,05 y 3,30 [mm].

Para la tercera de soldadura continua se soldaron dos láminas de metal de cobre de un espesor de 0,2 [mm]. En los primeros dos intentos se obtuvieron cordones de soldadura deficientes y deformes, mientras que para el tercer intento se obtuvieron cordones uniformes y continuos de un ancho aproximado de 1,75 [mm]. También se realizaron cordones sobre láminas de cobre realizando un movimiento tipo vaivén del cual se obtuvieron cordones de anchos aproximados de 4,25 [mm], 3,35 [mm] y 3,65 [mm].

Cabe mencionar que existe a una acumulación de material durante la deposición de estaño en todas las pruebas realizadas, sin embargo, se logró deposiciones aceptables sin defectos. Se recomienda utilizar un motor paso a paso en el sistema de alimentación de alambre de metal para

tener un mayor control sobre la deposición del material y cambiar el tipo de boquilla del cabezal soldador.

Finalmente la maquina soldadora CNC con movimientos en 3 ejes fue capaz de realizar la soldadura de un elemento electrónico THT en una PCB, mientras que también se demostró la capacidad de realizar cordones de soldadura continuos con la potencial capacidad no demostrada de realizar soldadura de componentes electrónicos SMT en una PCB.

8. Mejoras y recomendaciones

Para los futuros estudiantes y colegas que estén interesados en este proyecto o que resulte a fin toda la información expuesta aquí en este documento, las siguientes recomendaciones:

Para el diseño de la maquina soldadora CNC sería conveniente que no se comprasen los materiales ya fabricados, el poder fabricar cada elemento y tener contacto con los distintos procesos de fabricación es una parte esencial del entendimiento del proceso, ya que refuerza la interiorización del aprendizaje, mejora el desempeño, conductas y manejo de herramientas dentro de un taller metalmecánico.

Se recomienda mejorar la fabricación de la abrazadera del cabezal soldador, cambiar material y método de elaboración, recomendable una impresión 3D en PLA.

De ser posible realizar pruebas con el Extrusor MK8 y motor paso a paso en el sistema de alimentación de alambre para comparar resultados con los obtenidos en este proyecto.

9. Referencias

- [1] 3d Printing Lab, [Online], (2020), última revisión 24.09.20, extracción desde <<https://www.3dprintinglab.com.hk/blog/using-powder-based-printing-material-sls-3d-printing>>
- [2] 3dimpresora, [Online], (2021), última revisión 19.10.2021, extracción desde <<https://3dimpresora.net/tienda/extrusor-mk8-montado/>>
- [3] Aiyiti, W., Zhao, W., Lu, B. and Tang, Y. (2006), "Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 12 No. 3, pp. 165-172.
- [4] Aliexpress, [Online], (2021), última revisión 29.10.21, extracción desde <https://bqzz.en.alibaba.com/es_ES/?spm=a2700.wholesale.cordpanyb.2.72407a98DDUI0h>
- [5] Aliexpress, [Online], (2021), última revisión 29.10.21, extracción desde <https://xiaoweitech.en.alibaba.com/es_ES/?spm=a2700.details.cordpanyb.2.15d8413fvAlxi_h>
- [6] Aliexpress, [Online], (2021), última revisión 29.10.21, extracción desde <<https://julibrothers.en.alibaba.com/?spm=a2700.details.cordpanyb.2.55b47692lkZuTt>>
- [7] Amazon, [Online], (2021), última revisión 20.10.2021, extracción desde <<https://www.amazon.com/Soldering-Automatic-soldering-multifunctional-temperature/dp/B07VGVHP2Z>>
- [8] Amazon, [Online], (2021), última revisión 20.10.2021, extracción desde <<https://www.amazon.com/-/es/Alimentador-autom%C3%A1tico-soldadura-Electr%C3%B3nico-Soldadura/dp/B07ZVDVTK5>>
- [9] Arduino, [Online], (2021), última revisión 25.10.2021, extracción desde <<https://arduino.cl/producto/arduino-uno/>>
- [10] Boris Suazo Páez. (2018), *Economía Circular en Chile: Alcances, problemas y desafíos en la gestión de la ley REP*. Observatorio de Sostenibilidad Universidad de Chile: Santiago, Chile.
- [11] Budynas R. G. & Nisbett J. K. (2008), *Tornillos, sujetadores y diseño de uniones no permanentes, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley* (8va ed.) McGRAW-HILL: México.
- [12] CNC Shield V3 Relay Control, [Online], (2020), última revisión 13.10.20, extracción desde, <https://www.youtube.com/watch?v=RGGxlqCHI_c>
- [13] Custom Part Net, [Online], (2020), última revisión 30.09.20, extracción desde <<http://www.custompartnet.com/wu/jetted-photopolymer>>
- [14] Doughoung D., Z. Pan, D. Cuiuri, Li H. (2015), *Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer-Verlag: London
- [15] Ebay, [Online], (2021), última revisión 19.10.2021, <<https://www.ebay.com/itm/362795762074>>
- [16] Ebay, [Online], (2021), última revisión 19.10.2021, extracción desde <<https://www.ebay.com/itm/28444488596>>

-
- [17] Ebay, [Online], (2021), última revisión 19.10.2021, extracción desde <<https://www.ebay.com/itm/362795762074>>
- [18] Ebay, [Online], (2021), última revisión 19.10.2021, extracción desde <<https://www.ebay.es/itm/362999996700>>
- [19] Ebay, [Online], (2021), última revisión 19.10.2021, extracción desde, <<https://www.ebay.com/itm/224665243731>>
- [20] Ebay, [Online], (2021), última revisión 19.10.2021, extracción desde <<https://www.ebay.com/itm/271533189811>>
- [21] Engineering, [Online], (2020), última revisión 20.09.20, extracción desde <<https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/14946/The-Best-3D-Printer-Materials-Metals-Edition.aspx>>
- [22] F. Mources, E. Cicala, P. Sallamand, D. Grevey, B. Vannes, and S. Ignat., (2005), *Optimisation of refractory coatings realised with cored wire addition using a high-powder diode laser. International Journal OF Machine Tools and Manufacture*, 200:2283-2292.
- [23] F. Savart, (1833) *Memoire sur la Constitution des Veines Liquides Lancees par des Orifices Circulaires en Mince Paroi*, *Annales de Chimie et de Physique*, 53:337-386.
- [24] Fessler J.R., R. Merz, A.H. Nickel & F.B. Prinz, (1996), *Laser deposition of metal for shape deposition manufacturing: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Carnegie Mellon University: Pennsylvania.
- [25] Fullmecanica, [Online], (2021), última revisión 21.10.2021, extracción desde <<http://www.fullmecanica.com/definiciones/r/146-rosca-acme>>
- [26] Gibson, I & Rosen, D. & Stucker B., (2015). *Additive manufacturing technologies*. (2nd edition, 1-2). Springer: New York, ISBN 978-1-4939-2112-6.
- [27] Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna Materiales, Procesos y Sistemas* (3a. ed.). Mcgraw-hill Interamericana: Guadalajara, México.
- [28] Hifisac, [Online], (2021), última revisión 28.10.2021, extracción desde <<https://hifisac.com/shop/product/wcs10-1000-eje-quia-lineal-de-10mm-diametro-x-1-metro-largo-para-cnc-6686#attr>>
- [29] Hsiangneng, [Online], (2021), última revisión 20.10.2021, extracción desde <<https://www.hsiangneng.com/>>
- [30] Ics Uci Edu, [Online], última revisión 29.07.21, extracción desde <https://www.ics.uci.edu/community/news/spotlight/spotlight_hanratty.php>
- [31] Karen M. B. Tamiger and Robert A. Hafley (2003). *Electron Beam Deposition. En: Electron beam freeform fabrication: A rapid metal deposition process. (3rd Annual Composites Conference)*. Hampton, VA: Nasa Langley Research Center.
- [32] Kramer T. R, Proctor F. M & Messina E., (2000), *The NIST RS274/NGC Interpreter- Version 3*, U.S Department of Commerce: Gaithersburg, Maryland.
- [33] Lord Rayleigh, (1878), *On the Instability of Jets*, *Proceedings of the Royal Society of London, Mathematics*, 10:4-13, London.
-

-
- [34] Machine Design, [Online], (2020), última revisión 14.09.20 , extracción desde <<https://www.machinedesign.com/markets/manufacturing-equipment/article/21834498/3d-printing-tips-and-tech-get-to-know-those-acronyms>>
- [35] Machinetoolhelp, [Online], (2020), última revisión 26.07.2021, extracción desde <https://www.machinetoolhelp.com/Repairing/What_is_backlash.html>
- [36] Makerschile, [Online], (2021), última revisión 12.10.21, extracción desde <<https://makerschile.cl/producto/placa-perforada-pcb-9x15cm-fr4-fibra-vidrio-doble-faz/>>
- [37] Makerschile, [Online], (2021), última revisión 12.10.21, extracción desde <https://makerschile.cl/productos/maquinas_cnc/>
- [38] Makerschile, [Online], (2021), última revisión 12.10.21, extracción desde <<https://makerschile.cl/producto/rele-relay-5v-modulo-de-1-canal-250v-10amp-arduino-2/>>
- [39] Mci Electronics, [Online], (2021), última revisión 15.10.2021, extracción desde <<https://www.mcielectronics.cl/shop/product/rollo-de-soldadura-de-estano-250gr-28293>>
- [40] Mci Electronics, [Online], (2021), última revisión 15.10.2021, extracción desde <<https://www.mcielectronics.cl/shop/product/motor-paso-a-paso-nema-17-200-pasos-11329>>
- [41] Mercado Libre, [Online], (2021), última revisión 25.10.21, extracción desde <https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-573013659-pack-2pcs-rodamiento-lineal-lm8uu-8mm-largo-29mm-max--_JM>
- [42] Mercado Libre, [Online], (2021), última revisión 25.10.21, extracción desde <https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-573013659-pack-2pcs-rodamiento-lineal-lm8uu-8mm-largo-29mm-max--_JM>
- [43] Openbuilds Control, [Online], (2021), última revisión 25.10.2021, extracción desde <<https://software.openbuilds.com/>>
- [44] Petar Ostijic, [Online], (2020). Reunión Anual de Clientes 2020 ENGIE Perú - Economía Circular en un mundo post COVID-19, última revisión 02.12.21, extracción desde <https://www.youtube.com/watch?v=ST6oXkh3HwE&feature=youtu.be&t=688>
- [45] Q. Liu et Al., (2001), High Precisión Solder Droplet Printing Technology: Principe and Aplicattion, Proceedings on the International Symposium on Advanced Packaging Materials: Processes, Propieties and Interfaces, Missouri S&T: Missouri, EEUU.
- [46] R. S. Khandpur, (2005), Printed Circuit Boards: Design, Fabrication, Assembly and Testing. McGraw-Hill Education: New York, DOI: 10.1036/0071464204.
- [47] S.H. MOK, G. Bi, J. Folkes, and I. Pashby, (2008), Deposition of Ti6A4V using a high power diode laser and wire, Part II: Investigation on the mechanical propieties. Surface and Couatings Technology, 202:4613-4619.
- [48] Threeding, [Online], (2020), última revisión 30.09.20, extracción desde <<https://www.threeding.com/blog/%E2%80%8Bbinder-jetting-3d-printing-technology>>

Plano General Máquina Soldadora CNC

