



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)
CON COMUNICACIÓN INALÁMBRICA PARA
APLICACIONES DE LA INDUSTRIA 4.0.**

**TITULACIÓN INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA
PROFESIONAL**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**PRESENTA:
BRAYAN DANIEL VAZQUEZ GASCA**

**NOMBRE DEL ASESOR:
DR. ROBERTO MORALES CAPORAL**



APIZACO, TLAX., JUNIO 2024



Apizaco, Tlaxcala, 14/junio/2024

Departamento: Ingeniería Eléctrica y Electrónica
No. OFICIO IEE/665/2024

Asunto: Liberación de Proyecto
para la Titulación Integral

MARTIN ROJAS RAMÍREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
P R E S E N T E.

Por este medio me permito informar a usted que ha sido liberado el siguiente proyecto para la Titulación Integral:

Nombre del egresado:	BRAYAN DANIEL VÁZQUEZ GASCA
Carrera:	INGENIERÍA ELECTRÓNICA
No. de Control:	19370518
Nombre del proyecto:	"DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC) CON COMUNICACIÓN INALÁMBRICA PARA APLICACIONES DE LA INDUSTRIA 4.0"
Producto:	TITULACIÓN INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

Agradeciendo de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados, le envió un cordial saludo.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica®
Pensar para Servir, Servir para Triunfar®*

JAIME ALBERTO ELIZALDE OLIN
JEFE DEL DEPTO. DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO
DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA
Y ELECTRÓNICA


Roberto Morales Caporal
Nombre y Firma del Asesor

c.c.p. Expediente



Av. Instituto Tecnológico No. 418, San Andrés Ahuashuatepec, Municipio de Tzompantepec,
Tlaxcala, Mex. C.P. 90491 Tel. (241) 4172010 Ext. 145, e-mail: electronica@apizaco.tecnm.mx
tecnm.mx | apizaco.tecnm.mx





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Apizaco
División de Estudios Profesionales

Apizaco, Tlax., 25/junio/2024
No. OFICIO: DEP-CT/671/2024

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

BRAYAN DANIEL VAZQUEZ GASCA
EGRESADO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
CON NÚMERO DE CONTROL: 19370518
P R E S E N T E

Por este medio, me permito informar a usted que por aprobación de la comisión revisora asignada para valorar el trabajo que mediante la opción **TITULACIÓN INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL** cuyo tema es: **"DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC) CON COMUNICACIÓN INALÁMBRICA PARA APLICACIONES DE LA INDUSTRIA 4.0"**, conforme a lo establecido en el procedimiento para la obtención del Título Profesional en el Instituto Tecnológico, la División de Estudios Profesionales a mi cargo le otorga:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Debiendo entregar **3** empastados del mismo, apropiadamente encuadernados, a la brevedad, para presentar su acto de recepción profesional.

Sin otro particular por el momento, le envió un cordial saludo

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Pensar para Servir, Servir para Triunfar®

CÉSAR REYNALDO RAMOS GÓMEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO
DIVISIÓN DE
ESTUDIOS PROFESIONALES

c.p. archivo



Av. Instituto Tecnológico No. 418, San Andrés Ahuashuatepec, Municipio de Tzompantepec,
Tlaxcala, Mex. C.P. 90491 Tel. (241) 4172010 Ext. 304, e-mail:
dep_titulacion@apizaco.tecnm.mx



2024

Felipe Carrillo
PUERTO

Agradecimientos

Le agradezco a Dios por siempre acompañarme y guiarme a lo largo de mi carrera, por haberme dado la fortaleza para seguir adelante en momentos de debilidad.

Agradezco al Instituto Tecnológico de Apizaco por proporcionarme los recursos y el entorno necesarios para llevar a cabo mi carrera universitaria. Estoy profundamente agradecido a todos los docentes, ya que los conocimientos y habilidades adquiridos a lo largo de mi carrera se deben en gran parte a la dedicación, compromiso y vocación al impartir las clases. Gracias por compartir su sabiduría y por motivarme a alcanzar mis metas académicas y profesionales.

Agradezco sinceramente a mi asesor interno, Dr. Roberto Morales Caporal, por su confianza en mí y en el proyecto, permitiéndome colaborar con él, proporcionándome un espacio de trabajo y facilitándome los materiales y herramientas necesarios para llevar a cabo el proyecto de manera exitosa. Valoro enormemente la libertad que me otorgó para aplicar mis ideas al proyecto. Sobre todo, agradezco la motivación y apoyo para seguir preparándome en mis estudios profesionales.

Agradezco al Dr. Carlos Bueno Avendaño por sus valiosos consejos y recomendaciones, los cuales fueron de gran ayuda para el desarrollo y culminación de este proyecto. Su orientación fue fundamental para enfrentar los desafíos y tomar decisiones acertadas.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi madre, María Isabel Gasca Rivera (†), cuyo recuerdo y apoyo han sido un faro en mi vida, guiándome siempre a hacer las cosas bien. A mi padre, Clemente Vázquez Macedo, le agradezco infinitamente por ser mi guía y mi apoyo en cada paso de mi camino. Sus consejos y orientación han sido de gran ayuda en momentos difíciles, motivándome y apoyándome siempre a continuar con mis estudios académicos a pesar de las adversidades. Su presencia constante y su amor incondicional han sido mi mayor fortaleza. A mi hermano, Héctor Gabriel Vázquez Gasca, le agradezco su apoyo incondicional y su aliento constante, que han sido un pilar fundamental en mi vida. A todos ellos les dedico este logro, reconociendo que su amor y apoyo han sido fundamentales en esta etapa.

Quiero expresar mi agradecimiento a todos mis amigos y futuros colegas que me acompañaron a lo largo de mi carrera universitaria. Su compañía, apoyo y amistad fueron fundamentales para hacer de estos años una experiencia inolvidable. Juntos hemos compartido risas, desafíos y momentos de crecimiento personal y profesional que atesoraré siempre.

GRACIAS.

Índice General

Agradecimientos

Resumen

Índice de Figuras	viii
Índice de Tablas	xiii
Acrónimos	xiv
Capítulo 1. Generalidades del Proyecto.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Descripción de la Organización.....	2
1.2.1 Descripción del Área de Trabajo del Estudiante	5
1.2.2 Puesto de Trabajo del Estudiante	5
1.3 Planteamiento del Problema.....	6
1.4 Objetivos.....	7
1.4.1 Objetivo General.....	7
1.4.1 Objetivos Específicos	7
1.5 Justificación	8
Capítulo 2. Marco Teórico.....	9
2.1 Controladores Lógicos Programables	9
2.1.1 Historia de los PLC	9
2.1.2 Tipos de PLC	11
2.1.3 Componentes Internos de un PLC.....	12
2.1.4 Sectores Empresariales de Aplicación de PLC	13
2.2 Industria 4.0	15
2.2.1 Internet Industrial de las Cosas (IIoT)	17
2.3 Diseño Electrónico.....	19
2.4 Estándar IPC.....	20
2.4.1 Beneficios de Uso del Estándar IPC.....	20
2.4.2 Clasificación de Estándar IPC.....	21
2.4.3 IPC-A-600.....	25
2.4.4 IPC-A-610.....	30
Capítulo 3. Desarrollo e Implementación.....	35
3.1 Análisis de Requerimientos.....	37
3.1.1 Requisitos Funcionales:.....	37
3.1.2 Requisitos Técnicos	38
3.1.3 Restricciones.....	39
3.2 Diseño de Alto Nivel	41
3.2.1 Bloque de Entradas Digitales 24V DC	41

3.2.2 Bloque de Entradas Analógicas 0V~10V DC	44
3.2.3 Bloque de Entradas de Corriente 4-20mA DC	46
3.2.4 Bloque de Interfaz USB-UART	48
3.2.5 Bloque de Reloj en Tiempo Real	51
3.2.6 Bloque de Salidas a Relevador	52
3.2.7 Bloque de Salidas a Transistor 24V DC	54
3.2.8 Bloque de Fuente de Alimentación	55
3.2.10 Diagrama de Bloques Completo	58
3.3 Diseño de Componentes	59
3.3.1 Diseño de Entradas Digitales	59
3.3.2 Diseño de Entradas Analógicas 0V~10V DC	66
3.3.3 Diseño de Entradas Analógicas 4~20mA DC	70
3.3.4 Diseño de Convertidor USB - UART	73
3.3.5 Diseño de Reloj en Tiempo Real	79
3.3.6 Diseño de Salidas a Relevador	83
3.3.7 Diseño de Salidas Digitales 24VDC	85
3.3.8 Diseño de Fuente de Alimentación	88
3.3.9 Diseño de Microcontrolador ESP32	98
3.3.10 Validación de Diseño	101
3.4 Diseño Detallado	107
3.4.1 Creación de Proyecto	107
3.4.2 Diagrama esquemático	110
3.4.3 Diseño de Placa de Circuito Impreso	115
3.4.3 Representación 3D	124
3.5 Implementación	125
3.6 Etapa de Pruebas	135
3.6.1 Pruebas Unitarias	135
3.6.2 Pruebas de Integración	141
3.6.3 Pruebas del Sistema	141
3.6.4 Pruebas de Validación	141
3.6.5 Pruebas de Aceptación	142
Capítulo 4. Resultados	143
4.1 Prototipo PLC IIoT ITA-1600	143
4.1.1 Descripción del PLC IIoT ITA-1600	145
4.2 Hoja de Datos ITA-1600	146
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones	153
5.1 Conclusiones del Proyecto	153
5.2 Recomendaciones	154
5.3 Experiencia Profesional Adquirida	155

Competencias Desarrolladas y/o Aplicadas	156
Fuentes de Información	159
Anexos.....	164
ANEXO A: Árbol de Estándares IPC.....	164
ANEXO B: Hoja de Referencia SMD	165
ANEXO C: Diagrama Esquemático Completo.....	166
ANEXO D: Hoja de Datos PLC IloT ITA-1600.....	173

Índice de Figuras

Figura 1.2.1: Organigrama general del Instituto Tecnológico de Apizaco.....	3
Figura 1.2.2: Organigrama de organización del Instituto Tecnológico de Apizaco.....	3
Figura 1.2.3: Ubicación geográfica de la Institución en Apizaco, Tlaxcala.....	4
Figura 1.2.4: Espacio de trabajo proporcionado para el desarrollo del proyecto.....	5
Figura 2.1.1: Automatización por lógica de relés.....	9
Figura 2.1.2: Foto del equipo de diseño del MODICON 084. De izquierda a derecha: Dick Morley, Tom Boissevain, George Schwenk y Jonas Landau.....	10
Figura 2.1.3: Componentes internos de un PLC IloT.....	12
Figura 2.2.1: Revoluciones industriales y sus características.....	15
Figura 2.2.2: Tecnologías de la Industria 4.0.....	16
Figura 2.2.3: Comparación entre IloT e IoT.....	17
Figura 2.3.1: Diagrama general de diseño electrónico.....	19
Figura 2.4.1: Logotipo IPC.....	20
Figura 2.4.2: Características de la PCB clase 1 (Class 1) IPC.....	21
Figura 2.4.3: Ejemplos de PCB Clase 1, a la derecha (a) una PCB de un control remoto infrarrojo, a la izquierda (b) una PCB de juguete a radio control.....	22
Figura 2.4.4: Ejemplos de PCB clase 2, a la derecha (a) una PCB de un teléfono móvil, a la izquierda (b) una PCB de tarjeta de desarrollo FPGA.....	22
Figura 2.4.5: Ejemplos de PCB clase 3, a la izquierda (a) una PCB de automóvil eléctrico Medel 3 de Tesla Motors, a la izquierda (b) un dispositivo médico para medición de presión arterial.....	23
Figura 2.4.6: Ejemplo de PCB clase 4, a la izquierda (a) una PCB de grado militar de una aeronave, a la derecha (b) una tarjeta de vuelo de un satélite espacial CubeSat.....	23
Figura 2.4.7: Área de contacto contaminada en la PCB.....	25
Figura 2.4.8: Delaminación en una PCB.....	25
Figura 2.4.9: Delaminación en una PCB.....	26
Figura 2.4.10: Muesca en una PCB.....	26
Figura 2.4.11: Quemadura en una PCB.....	27
Figura 2.4.12: Muecas no deseadas en una PCB panelizada.....	27
Figura 2.4.13: Reducción no deseadas de pistas en una PCB.....	27
Figura 2.4.14: Conductor levantado en PCB.....	28
Figura 2.4.15: Serigrafía sobrepuesta en pads y serigrafía dañada.....	28
Figura 2.4.16: Mascara de soldadura desprendida en una PCB.....	29
Figura 2.4.17: PCB pandeada.....	29
Figura 2.4.18: Soldadura ideal.....	30
Figura 2.4.19: Soldadura aceptable.....	30
Figura 2.4.20: Defecto irregular.....	30
Figura 2.4.21: Daño en pad PCB.....	31
Figura 3.1: Grafica del modelo V adaptada para el desarrollo de sistemas electrónicos.....	35

Figura 3.1.1: Gabinete plástico a utilizar para utilizar en el PLC IloT	39
Figura 3.1.2: Tecnologías de componentes electrónicos PTH y SMD	40
Figura 3.2.1: Diagrama de bloques de las entradas digitales del PLC	41
Figura 3.2.2: Símbolo esquemático y apariencia física de un optoacoplador	42
Figura 3.2.3: Símbolo de compuerta NOT con Schmitt Trigger	42
Figura 3.2.4: Oscilograma donde se establecen dos umbrales y salida cuadrada	43
Figura 3.2.5: Comunicación entre varios dispositivos por medio de bus I2C	43
Figura 3.2.6: Diagrama de bloques de las entradas analógicas del PLC	44
Figura 3.2.7: El amplificador operacional como búfer se puede utilizar para aislar dos circuitos	45
Figura 3.2.8: Ecuación de divisor de voltaje y diagrama esquemático de divisor de voltaje	45
Figura 3.2.9: Diagrama de bloques de las entradas analógicas 4~20mA DC del PLC	46
Figura 3.2.10: Forma de medir el flujo de corriente es con una resistencia en derivación	46
Figura 3.2.11: Gráfico frecuencia de corte para filtro pasa bajas	47
Figura 3.2.12: Circuito de filtro de paso bajo RC de primer orden	47
Figura 3.2.13: Diagrama de bloques de interfaz USB-UART del PLC	48
Figura 3.2.14: Superficie dañada por ESD en capacitor MOS vista con microscopio de electrones	49
Figura 3.2.15: Etiqueta de precaución de ESD en placa electrónica	49
Figura 3.2.16: Grafico de pico de sobrevoltaje ocasionado por descarga ESD	50
Figura 3.2.17: En comunicación UART la comunicación se realiza por tramas de datos	50
Figura 3.2.18: Diagrama de bloques del Reloj en Tiempo Real (RTC) del PLC	51
Figura 3.2.19: Diagrama de bloques de las salidas a relevador del PLC	52
Figura 3.2.20: Configuración básica del transistor Darlington	52
Figura 3.2.21: Aplicaciones de uso para transistores Darlington	53
Figura 3.2.22: Transistores Darlington empaquetado en un circuito integrado	53
Figura 3.2.23: Diagrama de bloques de las salidas a transistor del PLC	54
Figura 3.2.24: MOSFET de canal N en modo de mejora para encender y apagar una lámpara simple	55
Figura 3.2.25: Diagrama de bloques de la fuente de alimentación del PLC	55
Figura 3.2.26: Topologías (a) Buck, (b) Simple boost, (c) Inverting, (d) Transformador flyback	56
Figura 3.2.27: Diagrama electrónico de conexión básica de regulador LDO	57
Figura 3.2.28: Diagrama de Bloques Completo del PLC IloT	58
Figura 3.3.1: Diagrama esquemático preliminar del bloque de entradas digitales de 24VDC	59
Figura 3.3.2: Encapsulado SOD-123	61
Figura 3.3.3: Encapsulado SOP-4	61
Figura 3.3.4: Tamaños, empaquetados y potencia de resistores SMD	62
Figura 3.3.5: Empaquetado 0603 LED	63
Figura 3.3.6: Empaquetados de resistor SMD	64
Figura 3.3.7: Empaquetado 0603x4	64
Figura 3.3.8: Empaquetado SOP-14	65
Figura 3.3.9: Empaquetado SOP-16	65

Figura 3.3.10: Diagrama esquemático preliminar del bloque de entradas analógicas 0V~10V	66
Figura 3.3.11: Empaquetado SOD-323.....	68
Figura 3.3.12: Empaquetado SOP-8.....	69
Figura 3.3.13: Diagrama esquemático preliminar del bloque de entradas analógicas 4~20 mA.....	70
Figura 3.3.14: Diagrama esquemático preliminar del bloque del conversor USB-UART.....	73
Figura 3.3.15: Diagrama esquemático preliminar de indicadores luminosos TXD y RXD.....	74
Figura 3.3.16: Diagrama esquemático preliminar de interruptores y auto-programación.....	74
Figura 3.3.17: Conector USB tipo B de montaje PCB.....	75
Figura 3.3.18: Empaquetado SOT23-6.....	76
Figura 3.3.19: Empaquetado SOP-16.....	76
Figura 3.3.20: Interruptor SMD 3x4x2mm.....	78
Figura 3.3.21: Oscilograma de efecto rebote en interruptor.....	78
Figura 3.3.22: Diagrama esquemático preliminar del bloque de reloj en tiempo real.....	80
Figura 3.3.23: Supercapacitor de disco 1F tipo V.....	81
Figura 3.3.24: Oscilador de Cristal 32 768 kHz.....	82
Figura 3.3.25: Diagrama esquemático preliminar del bloque de salidas a relevador.....	83
Figura 3.3.26: Empaquetado SOP-18.....	84
Figura 3.3.27: Relevador HF49FD.....	85
Figura 3.3.28: Diagrama esquemático preliminar del bloque de salidas a relevador.....	86
Figura 3.3.29: Diagrama esquemático preliminar de fuente de alimentación – protección de entrada.....	88
Figura 3.3.30: Diagrama esquemático preliminar de fuente de alimentación – conversor reductor.....	89
Figura 3.3.31: Diagrama esquemático preliminar de fuente de alimentación – regulador LDO.....	89
Figura 3.3.32: Diagrama esquemático preliminar de fuente de alimentación – regulador LDO.....	90
Figura 3.3.33: Terminal de tornillo KF128-5.0 de 2P y 3P.....	91
Figura 3.3.34: PPTC 1.85 A 30 V.....	91
Figura 3.3.35: Empaquetado DO-241 (SMB).....	92
Figura 3.3.36: Circuito de aplicación típica del XL2596.....	93
Figura 3.3.37: Tabla de procedimiento de diseño para XL2596 series.....	93
Figura 3.3.38: Empaquetado TO263-5L.....	94
Figura 3.3.39: Inductor serie CDRH74.....	94
Figura 3.3.40: Capacitor electrolítico SMD.....	94
Figura 3.3.41: Encapsulado SOT-223.....	95
Figura 3.3.42: Encapsulado de capacitor de tantalio SMD.....	96
Figura 3.3.43: Regulador DC-DC aislado.....	97
Figura 3.3.44: Diagrama esquemático preliminar del bloque de elementos del ESP32.....	98
Figura 3.3.45: Diagrama esquemático preliminar del microcontrolador SoC ESP32.....	99
Figura 3.3.46: ESP32-WROOM-32E-H4.....	101
Figura 3.3.47: Pruebas a nivel prototipo de entradas digitales de 24 V.....	102
Figura 3.3.48: Frecuencias de prueba, (a)1 Hz, (b)10 Hz, (c)100 Hz, (d)1 kHz, (e)5 kHz, (f)10 kHz.....	103

Figura 3.3.49: Circuito electrónico de entradas analógicas 0~10 V	103
Figura 3.3.50: Frecuencias prueba: (a)1 Hz, (b)10 Hz, (c)100 Hz, (d)1 kHz	104
Figura 3.3.51: Circuito electrónico de entradas analógicas 4~20 mA.....	104
Figura 3.3.52: Corriente de pruebas: (a)4 mA, (b)8 mA, (c)12 mA, (d)15 mA, (e)16 mA, (f)20 mA.....	105
Figura 3.3.53: Circuito electrónico de salidas a relevador.....	106
Figura 3.3.54: Circuito electrónico completo en fase de pruebas.....	106
Figura 3.4.1: Creación de nuevo proyecto en KiCad.....	107
Figura 3.4.2: Creación de nuevo proyecto en KiCad.....	108
Figura 3.4.3: Archivos del proyecto generados.....	108
Figura 3.4.4: Herramienta para cálculos de acuerdo con normas IPC.....	109
Figura 3.4.5: Bloque de título realizado en base a norma ANSI.....	110
Figura 3.4.6: Iconos de etiquetas en menú lateral en KiCad.....	111
Figura 3.4.7: Hoja jerárquica del proyecto.....	112
Figura 3.4.8: Página de portada del proyecto.....	113
Figura 3.4.9: Página de diagrama de bloques.....	114
Figura 3.4.10: Disposición preliminar de componentes electrónicos en PCB.....	115
Figura 3.4.11: Página web de JLCPCB de capacidades de fabricación y ensamblaje de PCB.....	116
Figura 3.4.12: Ventana de configuración de la placa en KiCad.....	116
Figura 3.4.13: Trazado de tamaño de PCB con base a dimensiones reales del gabinete.....	117
Figura 3.4.14: Huellas de componentes electrónicos en el área de trabajo PCB.....	117
Figura 3.4.15: Acomodo y trazado de pistas en PCB.....	118
Figura 3.4.16: Ancho de pistas para relevadores.....	118
Figura 3.4.17: Ruteo de entradas digitales y salidas a relevador en la PCB.....	119
Figura 3.4.18: Conversión de imagen a bitmap.....	119
Figura 3.4.19: Ranuras y muescas ayudan a aumentar distancia de fuga en la PCB.....	120
Figura 3.4.20: Ranura de aislamiento de 2 mm en área de relevadores.....	121
Figura 3.4.21: Ranura de aislamiento de 2 mm en área de optoacopladores.....	121
Figura 3.4.22: Ruteo final de PCB capa superior.....	122
Figura 3.4.23: Ruteo final de PCB capa inferior.....	122
Figura 3.4.24: Plano de tierra en capa superior e inferior.....	123
Figura 3.4.25: Ejecución del DRC en la PCB diseñada sin ningún error.....	123
Figura 3.4.26: Vista delantera de la PCB en 3D.....	124
Figura 3.4.27: Vista trasera de la PCB en 3D.....	124
Figura 3.5.1: Generación de archivos de fabricación de PCB.....	125
Figura 3.5.2: Pagina web del fabricante para ordenar la PCB.....	126
Figura 3.5.3: Detalles de fabricación de la PCB.....	126
Figura 3.5.4: PCB's recibidas en embalaje de protección sellado al vacío.....	127
Figura 3.5.5: Vista delantera y trasera de las PCB's recibidas.....	127
Figura 3.5.6: inspección entradas de 24V.....	128

Figura 3.5.7: Inspección de entradas 0~10V.....	128
Figura 3.5.8: Inspección de vías.....	128
Figura 3.5.9: Inspección de serigrafía y pads.....	128
Figura 3.5.10: inspección de pads SMD.....	128
Figura 3.5.11: inspección de agujeros PTH.....	128
Figura 3.5.12: Inspección de serigrafía.....	128
Figura 3.5.13: inspección de pads y pistas.....	128
Figura 3.5.14: inspección de zonas de cobre.....	129
Figura 3.5.15: inspección de terminales PTH.....	129
Figura 3.5.16: Componentes electrónicos para el ensamblaje de PCBA.....	129
Figura 3.5.17: Herramienta HTML BOM para colocar componentes en PCB.....	130
Figura 3.5.18: Colocación y soldadura de componentes en la PCB.....	131
Figura 3.5.19: PCBA del PLC IIoT con todos los componentes soldados.....	131
Figura 3.5.20: Lista completada de colocación de componentes en la PCBA.....	132
Figura 3.5.21: Resistor en red 0603 de pull-up.....	132
Figura 3.5.22: LED y resistores de TXD y RXD.....	132
Figura 3.5.23: Amplificador operacional MCP6002.....	133
Figura 3.5.24: Indicador LED de entrada digital.....	133
Figura 3.5.25: Capacitores de desacoplo.....	133
Figura 3.5.26: inspección de regulador lineal 3V3.....	133
Figura 3.5.27: Protección de entrada 24 V.....	133
Figura 3.5.28: Optoacopladores de entrada.....	133
Figura 3.5.29: Protección ESD entrada USB.....	133
Figura 3.5.30: Conversor USB-UART CH340C.....	133
Figura 3.5.31: Compuerta NOT Schmitt Trigger.....	134
Figura 3.5.32: Expansor E/S PCG8574.....	134
Figura 3.5.33: Resistores de entrada analógica.....	134
Figura 3.5.34: Indicadores LED de salida simétrica.....	134
Figura 3.6.1: Pruebas de voltajes internos del PLC, (a) 5 V (b) 3.3 V.....	135
Figura 3.6.2: (a) Medición de voltaje externo de 24 V, (b) LED's indicadores de voltajes de la placa.....	136
Figura 3.6.3: (a) Medición de voltaje positivo 12 V, (b) Medición de voltaje negativo -12 V.....	136
Figura 3.6.4: (a) indicadores LED de TXD y RXD, (b) Carga de firmware al PLC.....	137
Figura 3.6.5: (a) Prueba 1 de entradas digitales, (b) Prueba 2 de entradas digitales.....	137
Figura 3.6.6: (a) Voltaje 1 aplicado a la entrada analógica, (b) Voltaje medido por el ESP32.....	138
Figura 3.6.7: (a) Voltaje 2 aplicado a la entrada analógica, (b) Voltaje medido por el ESP32.....	138
Figura 3.6.8: (a) Corriente 1 aplicada en la entrada analógica, (b) Corriente medida por el ESP32.....	139
Figura 3.6.9: (a) Corriente 2 aplicada en la entrada analógica, (b) Corriente medida por el ESP32.....	139

Figura 3.6.10: Prueba de salidas a relevador, LED's indican funcionamiento correcto.....	140
Figura 3.6.11: Prueba de salidas digitales, LED's indican funcionamiento correcto de las salidas.....	140
Figura 3.6.12: Prueba del sistema en conjunto con fuente de alimentación y contactor.....	141
Figura 3.6.13: Prueba de aceptación en el laboratorio en presencia del asesor interno.....	142
Figura 3.6.14: Prueba de funcionamiento en laboratorio.....	142
Figura 4.1.1: Prototipo del PLC IIoT ITA-1600 junto con fuente de alimentación y contactor.....	144
Figura 4.1.2: Vista superior del PLC descripción de terminales.....	148
Figura 4.1.3: Señalamiento de LED's indicadores en placa del PLC.....	150
Figura 4.1.4: Señalamiento de LED's indicadores de entradas digitales.....	151
Figura 4.1.5: Señalamiento de LED's indicadores de salidas a relevador.....	152
Figura 4.1.6: Señalamiento de LED's indicadores de salidas a relevador.....	153

Índice de Tablas

Tabla 1: Comparación entre tipos de PLC.....	11
Tabla 2: Resumen de clasificación de PCB de acuerdo con normativa IPC.....	24
Tabla 3: Criterios de aceptación de soldadura para componentes tipo chip SMD con la IPC 610.....	31
Tabla 4: Criterios de inspección visual dimensional para componentes tipo ala de gaviota IPC 610.....	33
Tabla 5: Características técnicas.....	146
Tabla 6: Descripción de terminales del PLC.....	149

Acrónimos

- **AC:** Alternated Current (Corriente Alterna)
- **ADC:** Analog-to-Digital Converter (Conversor Analógico a Digital)
- **BOM:** Bill Of Materials (Lista de materiales)
- **DC:** Direct Current (Corriente Directa)
- **DRC:** Design Rule Check (Verificación de reglas de diseño).
- **EMC:** Electromagnetic Compatibility (Compatibilidad Electromagnética)
- **ESD:** Electro Static Discharge (Descarga Electrostática)
- **ESR:** Equivalent series resistance (Resistencia Serie Equivalente)
- **GPIO:** General Purpose Input/Output (Entrada/Salida de Propósito General)
- **I2C:** Inter-Integrated Circuit (Circuito inter-integrado)
- **IPC:** Association Connecting Electronics Industries (Asociación de Industrias Electrónicas del Conexionado)
- **IIoT:** Industrial Internet of Things (Internet Industrial de las Cosas)
- **IoT:** Internet of Things (Internet de las Cosas)
- **LED:** Light Emitting Diode (Diodo Emisor de Luz)
- **LDO:** Low Dropout Regulator (Regulador de Baja Caída)
- **LPF:** Low Pass-Filter (Filtro Pasa-Bajas)
- **PCBA:** Printed Circuit Board Assembly (Ensamblaje de Placa de Circuito Impreso)
- **PCB:** Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impreso)
- **PLC:** Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable)
- **PPTC:** Polymeric Positive Temperature Coefficient (Coeficiente de Temperatura Positivo Polimérico)
- **PTH:** Pass Through Hole (Tecnología de Agujeros Pasantes)
- **RTC:** Real Time Clock (Reloj en Tiempo Real)
- **RXD:** Receive Data (Datos Recibidos)
- **SMD:** Surface Mount Device (Dispositivo de Montaje Superficial)
- **SOP:** Small Outline Package (Empaquetado de Contorno Pequeño)
- **SOD:** Small Outline Diode (Diodo de Contorno Pequeño)
- **SoC:** System-on-a-Chip (Sistema en un chip)
- **TVS:** Transient Voltage Suppressor (Supresor de voltaje transitorio)
- **UART:** Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal)
- **USB:** Universal Serial Bus (Bus Universal en Serie)

Capítulo 1. Generalidades del Proyecto

1.1 Introducción

En el contexto de la industria moderna, la digitalización y la automatización se han convertido en pilares fundamentales para mejorar la eficiencia y la productividad. La Industria 4.0, como paradigma emergente, busca integrar tecnologías digitales para transformar los procesos industriales. Dentro de este panorama, los Controladores Lógicos Programables (PLC) desempeñan un papel crucial como dispositivos de control en sistemas industriales. Sin embargo, los PLC tradicionales presentan limitaciones en términos de conectividad y adaptabilidad a los requisitos de la Industria 4.0. La demanda de dispositivos electrónicos con capacidades de comunicación inalámbrica a Internet se ha vuelto cada vez más evidente, así como la necesidad de formar profesionales capacitados en el diseño y desarrollo de estos sistemas.

Este informe aborda la problemática de diseñar y desarrollar un Controlador Lógico Programable con Comunicación Inalámbrica que satisfaga las demandas de conectividad y flexibilidad requeridas en la Industria 4.0, al tiempo que promueva la formación profesional en el ámbito del diseño electrónico y la automatización industrial.

El informe está estructurado en varios capítulos para proporcionar una comprensión detallada del proyecto. En el Capítulo 1, se introduce el problema, se describen los objetivos y se justifica la relevancia del proyecto. El Capítulo 2 presenta el marco teórico sobre PLCs, Industria 4.0, diseño electrónico y estándares IPC. Luego, en el Capítulo 3, se detalla el proceso de desarrollo e implementación del PLC, seguido por los resultados obtenidos como el prototipo y manuales de usuario en el Capítulo 4. Finalmente, en el Capítulo 5, se presentan las conclusiones, recomendaciones y la experiencia adquirida durante el proyecto.

Este informe presenta los resultados obtenidos en el proceso de diseño y desarrollo del PLC IIoT. A través de una investigación exhaustiva y la aplicación de metodologías adecuadas, se ha logrado alcanzar los objetivos planteados y se espera que los resultados obtenidos beneficien al avance del conocimiento en el campo del diseño electrónico en el área de la automatización industrial.

1.2 Descripción de la Organización

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Apizaco.

El Instituto Tecnológico de Apizaco es una institución pública de educación superior que forma parte del Tecnológico Nacional de México, adscrito a la Secretaría de Educación Pública.

El Instituto ofrece una amplia gama de programas académicos, que incluyen 11 ingenierías, 3 maestrías y un doctorado. Su oferta educativa está diseñada para proporcionar una formación integral, desde una base general hasta especialidades específicas, con un enfoque en el fortalecimiento científico y metodológico de los estudiantes. Cada carrera cuenta con planes de estudio basados en una estructura genérica, una especialidad y una residencia profesional, permitiendo a los estudiantes adquirir habilidades y conocimientos relevantes para satisfacer las demandas de los sectores productivo y social.

Misión

Formar profesionistas que sean líderes visionarios, emprendedores, con capacidad de generar soluciones disruptivas, innovando en la ciencia y la tecnología, comprometidos con el desarrollo económico, responsabilidad social teniendo una visión sostenible y sustentable.

Visión

Ser una Institución de educación superior tecnológica de vanguardia, formadora de ciudadanos del mundo, con conocimientos intercultural, respetando la diversidad social.

Valores

- **Honestidad:** Se demuestra día a día a través de la transparencia con la ejecución de las actividades laborales cotidianas.
- **Responsabilidad:** Es la actitud que caracteriza al personal en el cumplimiento de su tarea con eficacia y eficiencia en beneficio de la comunidad.
- **Lealtad:** Es la actitud que caracteriza al personal del Instituto Tecnológico de Apizaco, aplica sus conocimientos y habilidades en el logro de las metas institucionales, sin olvidar en ningún momento el lema:

“Pensar para servir, servir para triunfar ®”

Organigrama



Figura 1.2.1: Organigrama general del Instituto Tecnológico de Apizaco

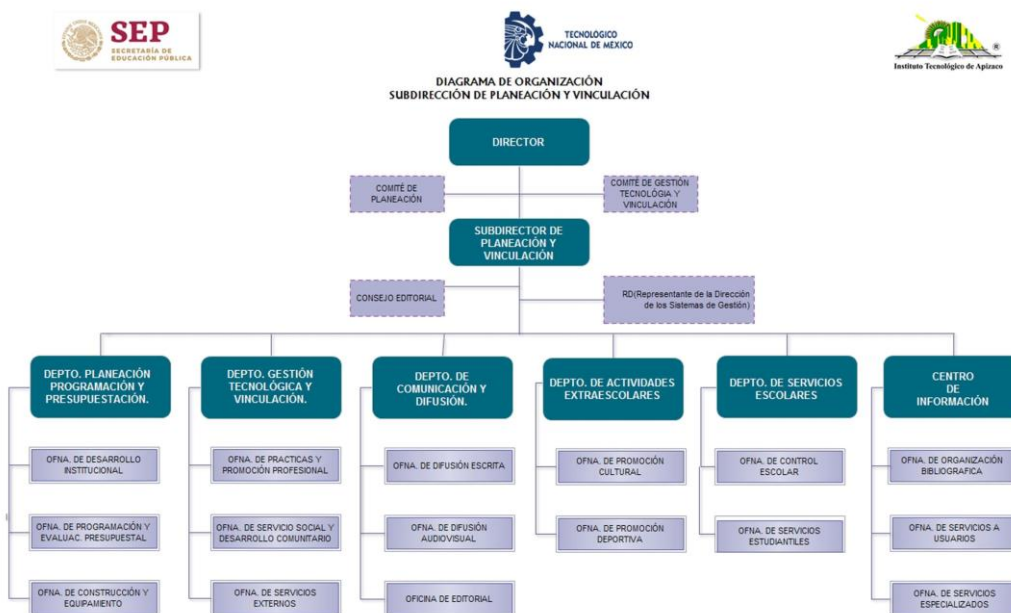


Figura 1.2.2: Organigrama de organización del Instituto Tecnológico de Apizaco.

Ubicación Geográfica



Figura 1.2.3: Ubicación geográfica de la Institución en Apizaco, Tlaxcala.

Dirección: Av. Instituto Tecnológico No. 418, San Andrés Ahuashuatepec, Municipio de Tzompantepec, Tlaxcala, Méx. C.P. 90491.

R.F.C: TNM140723GFA

Teléfono: 241 417 2010 ext. 101

Correo Electrónico: dirección@apizaco.tecnm.mx

Sitio Web: <https://www.apizaco.tecnm.mx/>

1.2.1 Descripción del Área de Trabajo del Estudiante

El proyecto se llevó a cabo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Apizaco, específicamente en el edificio Q, que alberga el Laboratorio de Ingeniería Electrónica. El espacio asignado para el desarrollo del proyecto fue dentro el Aula Q-1, equipada con el mobiliario necesario, herramientas, instrumentos de medición y equipo de cómputo esencial para la ejecución exitosa del proyecto.

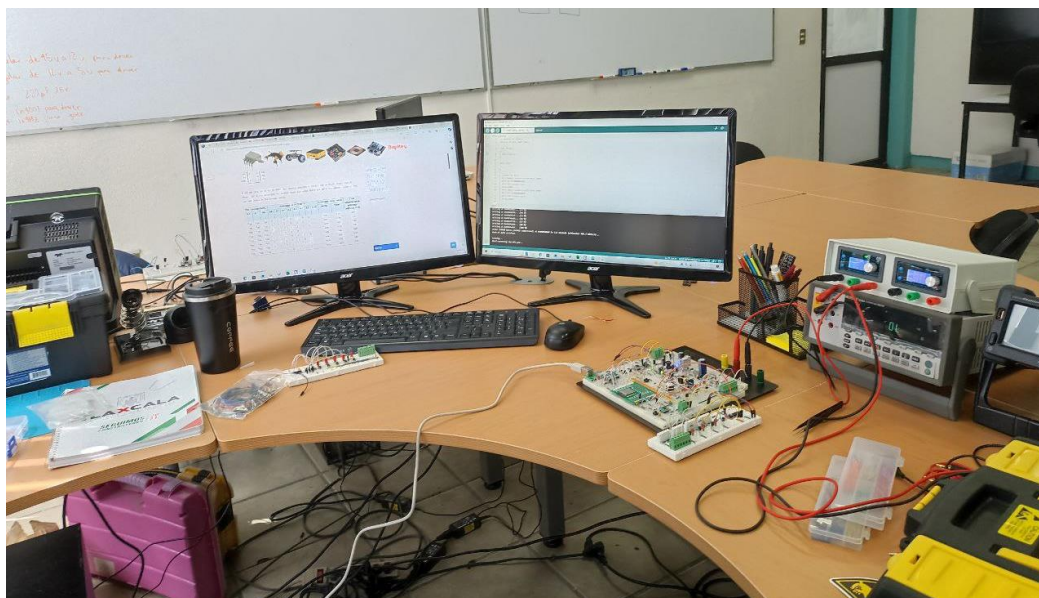


Figura 1.2.4: Espacio de trabajo proporcionado para el desarrollo del proyecto.

1.2.2 Puesto de Trabajo del Estudiante

Dentro del área de investigación, se asignó al estudiante el puesto de *Diseñador Electrónico*, con responsabilidades que abarcan desde liderar el diseño y desarrollo de los circuitos electrónicos hasta contribuir en la elaboración de la documentación técnica del proyecto. El estudiante colaboró activamente en el proceso de desarrollo del dispositivo Controlador Lógico Programable (PLC) IIoT, siguiendo la metodología basada en el modelo V. Este enfoque implicó la participación del estudiante en todas las etapas del desarrollo, desde la identificación de requisitos hasta la implementación y las pruebas del sistema. Su responsabilidad incluyó el diseño, simulación y verificación de los circuitos necesarios para el PLC IIoT y la implementación de un prototipo funcional.

1.3 Planteamiento del Problema

La revolución de la Industria 4.0 ha impulsado una transformación sin precedentes en los entornos industriales, donde la digitalización y la automatización son pilares fundamentales. Dentro de este contexto, los Controladores Lógicos Programables (PLC) son dispositivos esenciales para el control y la supervisión de procesos industriales. Sin embargo, los PLC convencionales enfrentan limitaciones significativas en términos de conectividad y adaptabilidad a los estándares modernos de la Industria 4.0.

Además, los dispositivos PLC comerciales se consideran bajo secreto industrial, lo que significa que su funcionamiento interno no es accesible al público. Estos dispositivos son prácticamente cajas negras, lo que presenta un obstáculo considerable para el diseño y desarrollo de nuevas soluciones. Esta falta de transparencia requiere que se realice una investigación y experimentación de distintos circuitos electrónicos para comprender y replicar las funciones necesarias en un nuevo diseño.

En este sentido, el proyecto enfrenta el desafío de diseñar y desarrollar un Controlador Lógico Programable con Comunicación Inalámbrica que cumpla con los requisitos de conectividad y flexibilidad para la Industria 4.0. Esta iniciativa no solo busca superar las limitaciones de los PLC tradicionales, sino también proporcionar una herramienta educativa para la formación profesional en diseño electrónico y automatización industrial.

El proyecto abordará esta problemática mediante el diseño y desarrollo de un PLC con capacidades de comunicación inalámbrica, robustez eléctrica, entradas analógicas y digitales, salidas a relé y digitales. Este dispositivo tiene como fin el fomentar el crecimiento y la capacitación profesional en el área del diseño electrónico. Para lograrlo, será necesario investigar diversas formas y técnicas para replicar las funciones críticas de los PLC comerciales y adaptar estas soluciones a los nuevos requisitos tecnológicos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Desarrollar e Implementar un Controlador Lógico Programable (PLC) con Comunicación Inalámbrica para Aplicaciones de la Industria 4.0.

1.4.1 Objetivos Específicos

- Realizar una investigación sobre técnicas, normas y metodología empleadas en el diseño electrónico para identificar mejores prácticas y enfoques utilizados en la industria.
- Realizar el análisis de requerimientos del dispositivo PLC a desarrollar.
- Realizar el desarrollo del hardware y firmware del prototipo de PLC.
- Realizar la implementación del prototipo de PLC.
- Realizar pruebas y validación del PLC en un entorno controlado.
- Elaborar la documentación técnica del PLC.

1.5 Justificación

La realización del presente proyecto se fundamenta en la necesidad de fomentar el desarrollo de habilidades y conocimientos en el ámbito del diseño electrónico, especialmente en un contexto donde la disponibilidad de capital humano capacitado en esta área es limitada. El proyecto se concibió como una oportunidad de adquirir experiencia práctica en el proceso completo de desarrollo de un dispositivo electrónico, desde la idea inicial hasta la implementación de un prototipo. Al llevarse a cabo en el entorno académico, el proyecto brinda a los involucrados en el proyecto la oportunidad de aprender y aplicar conceptos teóricos en un proyecto práctico y tangible.

El diseño y desarrollo de un Controlador Lógico Programable (PLC) con Comunicación Inalámbrica se seleccionó como el tema central del proyecto debido a su relevancia en el campo de la Industria 4.0 y la automatización industrial, alineándose con el objetivo de la carrera de Ingeniería Electrónica que se imparte en el Instituto Tecnológico de Apizaco. Su principal valor radica en su potencial como herramienta didáctica para otros estudiantes interesados en aprender sobre el diseño y la programación de sistemas de control. Además, la inclusión de tecnologías inalámbricas, como el ESP32, permite una mayor flexibilidad y accesibilidad en el proceso de programación y control del PLC.

La conveniencia de este proyecto radica en su capacidad para fomentar el desarrollo de habilidades prácticas y teóricas en el ámbito del diseño electrónico y la automatización industrial. Asimismo, sus posibles aportaciones incluyen la mejora de la comprensión y aplicación de conceptos relacionados con la Industria 4.0, así como el enriquecimiento del proceso formativo al proporcionar una experiencia práctica en el desarrollo de dispositivos electrónicos. Se espera que los resultados de este proyecto beneficien a contribuir al avance del conocimiento y las técnicas en el campo del diseño electrónico aplicado a la automatización industrial. Además, el proyecto podría sugerir ideas y recomendaciones para futuros proyectos relacionados, promoviendo así la mejora continua en este ámbito.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Controladores Lógicos Programables

Un PLC, también conocido como controlador lógico programable o autómatas programables, constituye un sistema electrónico fundamental en entornos industriales. Su función principal radica en el almacenamiento de instrucciones de control programables por el usuario, las cuales permiten ejecutar diversas acciones como control lógico, secuencial, temporización, conteo y operaciones aritméticas, facilitando así el control de máquinas y procesos mediante señales de entrada y salida, tanto digitales como analógicas (Sicma21, 2021).

En esencia, un PLC se asemeja a una computadora personal en cuanto a su capacidad para realizar tareas de control, si bien está especialmente diseñado para aplicaciones industriales. En términos estructurales, un PLC consta de entradas, salidas, un sistema operativo y una interfaz que posibilita la carga de programas personalizados por el usuario.

2.1.1 Historia de los PLC

A mediados del siglo XIX, el uso de automatismos mecánicos en la industria experimentó un crecimiento significativo. En ese contexto, para gestionar las complejas funciones requeridas en estos procesos, se empleaba la lógica cableada, que implicaba el uso de circuitos con relés, contadores y otros dispositivos (COMASTECH, 2022).

En situaciones donde el proceso era de considerable tamaño o complejidad, el resultado podía ser un cuadro eléctrico similar al que se ilustra en la figura 2.1.1.

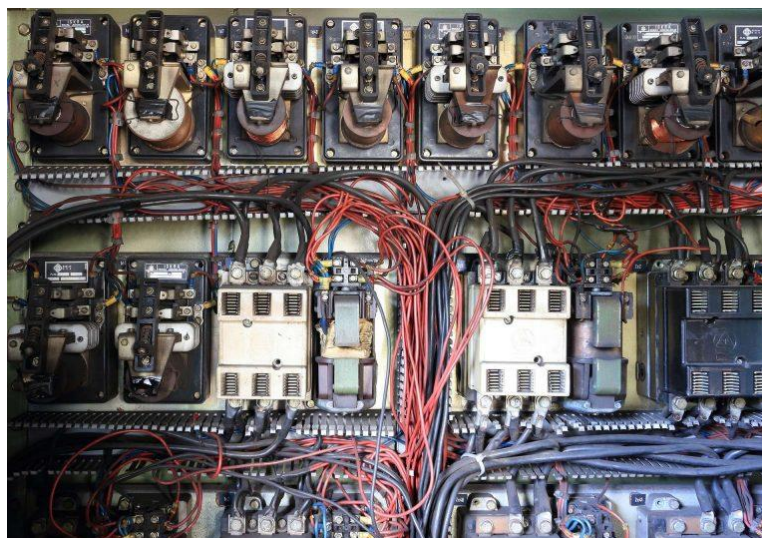


Figura 2.1.1: Automatización por lógica de relés.

En 1968, ante la creciente necesidad de dispositivos flexibles a los cambios en el entorno y resistentes a diversos factores ambientales y perturbaciones eléctricas, General Motors organizó un concurso de propuestas para sustituir los sistemas de cuadros cableados de relés por soluciones electrónicas (Editora Microbyte, 2023).

El equipo de ingenieros de Bedford Associates liderado por Dick Morley presentó la propuesta ganadora con su Controlador Digital Modular MODICOM 084, quien es ampliamente reconocido como el "padre" de los PLC. Como resultado, Bedford Associates fundó Modicon (MODular DIGital CONTroler) para desarrollar, mejorar y comercializar el prototipo ganador. La marca Modicon fue adquirida en 1977 por Gould Electronics, y posteriormente pasó a manos de las empresas alemana AEG y francesa Schneider Electric, que la posee en la actualidad (COMASTECH, 2022).



Figura 2.1.2: Foto del equipo de diseño del MODICON 084. De izquierda a derecha: Dick Morley, Tom Boissevain, George Schwenk y Jonas Landau.

Después de la creación del Controlador Digital Modular MODICOM 084 y el establecimiento de Modicon, la tecnología de los PLC experimentó un rápido avance y una adopción generalizada en la industria. Con el tiempo, los PLC evolucionaron para ofrecer una mayor capacidad de procesamiento, más memoria y una funcionalidad más avanzada. En las décadas siguientes, se desarrollaron diversos estándares de comunicación para permitir la conectividad de los PLC con otros dispositivos y sistemas en la planta de producción. Esto incluyó protocolos como Profibus, Modbus, Ethernet/IP y otros, que facilitaron la integración de los PLC en redes industriales más amplias (Parra, 2020).

2.1.2 Tipos de PLC

Los controladores lógicos programables (PLC) se clasifican principalmente en dos categorías: basados en hardware y basados en software. Los PLC de hardware son de uso general y se pueden ampliar con módulos adicionales, mientras que los PLC de software utilizan el procesador del ordenador y su rendimiento puede disminuir con cargas de trabajo elevadas. Además, existen los PLC compactos, donde todos los componentes están en una sola placa dentro de una carcasa, y los PLC de ranura, que funcionan como tarjetas PCI conectables y están diseñados para tareas específicas. Los PLC de ranura tienen un coprocesador y su propio sistema operativo, permitiéndoles funcionar de manera independiente del procesador del ordenador (Amidata, 2023).

La tabla 1 muestra de manera resumida las características principales de cada tipo de PLC.

Tabla 1: Comparación entre tipos de PLC.

PLC por Hardware	PLC por Software	PLC Compacto	PLC de Ranura
Solución de hardware de PLC con las funciones más importantes	Solución de software de PLC	Dimensiones reducidas	Tamaño compacto
Funciones ampliables en caso necesario	Fácil de usar	Económico	Fuente de alimentación propia incorporada
Tiempo de inicio rápido	Arranque lento	Ideal para tareas de menor envergadura	Comunicación simplificada entre controlador y PC
Buen comportamiento en tiempo real	Riesgo de inestabilidad con cargas altas		

Según su estructura y funcionalidad, hay una distinción nítida entre PLC por hardware y por software. Los PLC clásicos o por hardware están basados en hardware. Son de uso general y suelen tener solo las funciones de control más importantes, aunque es posible ampliarlos con módulos adicionales.

2.1.3 Componentes Internos de un PLC

Un controlador programable sofisticado y avanzado cuenta con un diseño inteligente que incluye componentes esenciales. Desde puertos serie y módulos de entrada digital hasta conectores de cable a placa, memoria y elementos pasivos, estos componentes se integran para formar PLC de alto rendimiento que son líderes en la industria (Amidata, 2023).

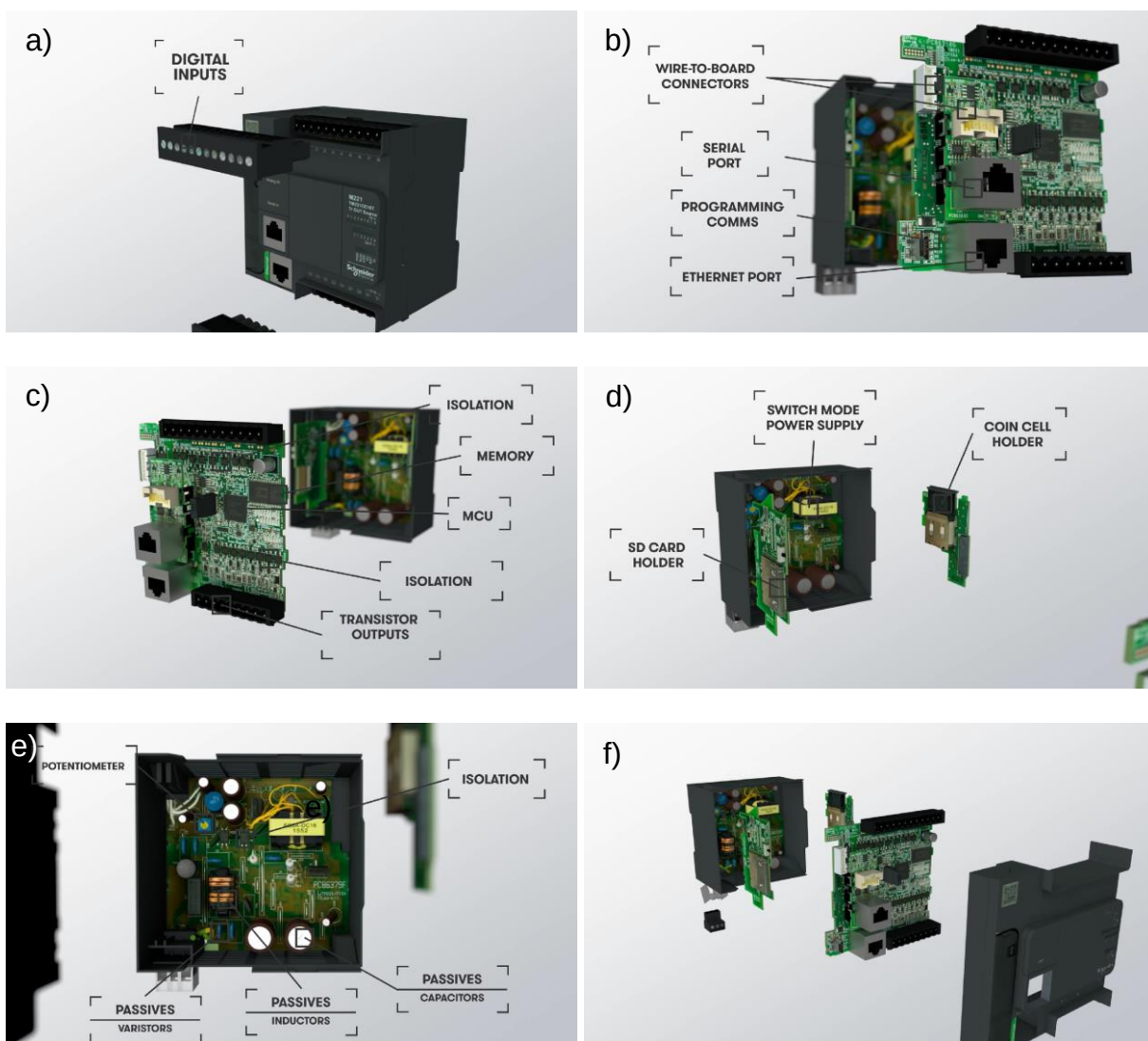


Figura 2.1.3: Componentes internos de un PLC IloT.

La figura 2.1.3 presenta varias partes del PLC: la parte (a) muestra las terminales de tornillo entradas digitales del PLC; la parte (b) detalla las secciones de comunicación, incluyendo los conectores de placa a placa, el puerto serial, la comunicación de programación y el puerto Ethernet; la parte (c) expone otra sección de la placa que incluye el aislamiento optoelectrónico

de las entradas digitales, la memoria, el microcontrolador, el aislamiento de salida y las salidas a transistor; la parte (d) muestra la batería tipo botón de respaldo del RTC, la fuente de alimentación conmutada y el soporte para tarjeta SD de memoria externa; y la parte (e) revela las partes internas de la fuente de alimentación, que incluyen el aislamiento, los capacitores pasivos, los inductores pasivos, los varistores pasivos y el potenciómetro de ajuste de voltaje.

2.1.4 Sectores Empresariales de Aplicación de PLC

A continuación, se listan los principales sectores empresariales que han utilizado estos autómatas, multiplicando la eficiencia en sus sistemas y ahorrando costos (GSL Industries, 2021).

- **Empresas dedicadas al procesamiento de cemento y arenas:** Utilizan PLC para controlar los procesos de mezcla, dosificación y empaquetado, mejorando la precisión y reduciendo el desperdicio de materiales.
- **Elaboradores de plástico:** Implementan PLC en máquinas de moldeo por inyección y extrusión para optimizar la producción y garantizar la uniformidad de los productos.
- **Fabricación de maderas, muebles y puertas:** Utilizan PLC en líneas de producción automatizadas para cortar, ensamblar y terminar productos de madera con alta precisión y eficiencia.
- **Empresas de seguridad y transporte:** Emplean PLC en sistemas de control de acceso, supervisión de tráfico y gestión de flotas para mejorar la seguridad y la operatividad.
- **Instalación de aires acondicionados y calefacción:** Utilizan PLC para la automatización de sistemas HVAC, mejorando la eficiencia energética y el control climático en edificios residenciales y comerciales.
- **Industrias de automóviles y neumáticos:** Utilizan PLC en líneas de ensamblaje y producción automatizada para garantizar la precisión y calidad en la fabricación de vehículos y componentes.
- **Corporaciones petroleras y químicas:** Implementan PLC en refinerías y plantas químicas para supervisar y controlar procesos complejos, garantizando la seguridad y eficiencia operativa.

- **Compañías energéticas:** Utilizan PLC para la gestión y control de redes eléctricas, plantas de generación y sistemas de distribución, optimizando la producción y el consumo de energía.
- **Empresas de marketing:** Utilizan PLC en la automatización de displays interactivos y sistemas de publicidad dinámica, mejorando la eficacia de las campañas de marketing.
- **Gestión de tráfico:** Emplean PLC en sistemas de control de semáforos, señales de tráfico y gestión de flujo vehicular para mejorar la seguridad y reducir la congestión.
- **Urbanizaciones residenciales:** Utilizan PLC en sistemas de automatización de viviendas inteligentes, incluyendo control de iluminación, seguridad, y gestión de recursos como agua y electricidad.
- **Industria alimentaria y de bebidas:** Utilizan PLC para automatizar procesos de producción, envasado y etiquetado, garantizando la calidad y seguridad de los productos alimentarios.
- **Sector farmacéutico:** Emplean PLC en la producción y empaquetado de medicamentos, asegurando la precisión y conformidad con las normativas sanitarias.
- **Minería y procesamiento de minerales:** Utilizan PLC para la supervisión y control de operaciones mineras, mejorando la eficiencia y seguridad en la extracción y procesamiento de minerales.
- **Sector textil:** Implementan PLC en la automatización de procesos de fabricación de textiles y confección de prendas, optimizando la producción y reduciendo los tiempos de entrega.
- **Industria del vidrio y cerámica:** Utilizan PLC para controlar procesos de fundición, moldeado y acabado, mejorando la calidad y eficiencia de los productos.

Como se puede apreciar en la lista, los PLC están involucrados en distintos sectores productivos, desempeñando un papel crucial en la automatización y optimización de procesos. Su capacidad para mejorar la precisión, reducir costos y aumentar la eficiencia operativa los convierte en una herramienta indispensable en la industria moderna. Desde el control de procesos complejos en plantas químicas hasta la automatización de líneas de producción en la industria textil, los PLC han demostrado su versatilidad y eficacia en una amplia gama de aplicaciones. Además, su implementación en sistemas de gestión de energía y tráfico subraya su importancia en la mejora de la sostenibilidad y la seguridad en entornos urbanos e industriales.

2.2 Industria 4.0

La Industria 4.0 implica la digitalización completa del sector industrial, permitiendo la toma de decisiones en tiempo real, una mayor productividad y flexibilidad. Esta revolución está redefiniendo la forma en que las empresas fabrican, mejoran y distribuyen sus productos, integrando tecnologías como IoT, computación en la nube, IA y aprendizaje automático. Las fábricas inteligentes, equipadas con sensores avanzados y robótica, recopilan y analizan datos para optimizar las decisiones. Al integrar datos de producción con sistemas empresariales, se logra una visibilidad completa y mayor eficiencia. Estas tecnologías permiten automatización, mantenimiento predictivo y respuesta rápida a las demandas del cliente. El desarrollo de fábricas inteligentes representa una oportunidad para la industria manufacturera, con gestión en tiempo real de activos y mantenimiento predictivo para minimizar el tiempo de inactividad del equipo (IBM, 2023).

La Industria 4.0 representa la digitalización y automatización de los procesos de fabricación, permitiendo la toma de decisiones en tiempo real y una mayor eficiencia productiva. Este concepto surge como la cuarta revolución industrial, siguiendo a la introducción de la energía hidráulica y de vapor en la Primera Revolución Industrial, la incorporación de la electricidad y las líneas de montaje en la Segunda Revolución Industrial, y la digitalización de las fábricas con la inclusión de computadoras y PLCs en la Tercera Revolución Industrial. La Industria 4.0 se caracteriza por la integración de tecnologías como IoT, IA y computación en la nube para optimizar los procesos de fabricación y responder de manera ágil a las demandas del mercado (IBM, 2023).

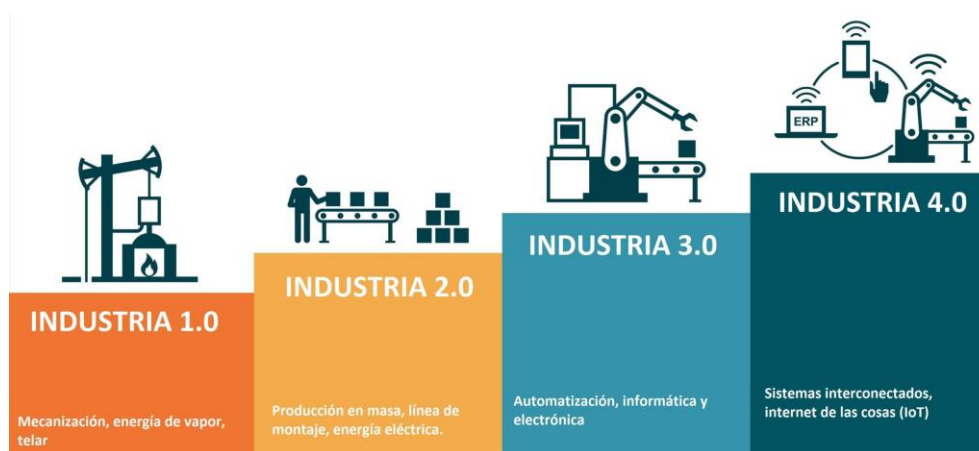


Figura 2.2.1: Revoluciones industriales y sus características.

La Industria 4.0 es fundamental porque no solo transforma los procesos de fabricación, sino que también tiene un impacto profundo en todas las industrias y sectores, así como en la sociedad en general. Esta revolución no solo mejora las operaciones empresariales y el crecimiento de los ingresos, sino que también transforma productos, cadenas de suministro y las expectativas de los clientes. Además, la Industria 4.0 tiene el potencial de cambiar la forma en que interactuamos con las empresas y los productos, así como de generar cambios en la fuerza laboral, lo que requiere nuevas habilidades y roles. Además, las tecnologías asociadas con la Industria 4.0 pueden dar lugar a nuevos productos y servicios innovadores, impulsando mejoras en la creación, pruebas y conectividad de productos (Deloitte, 2024).

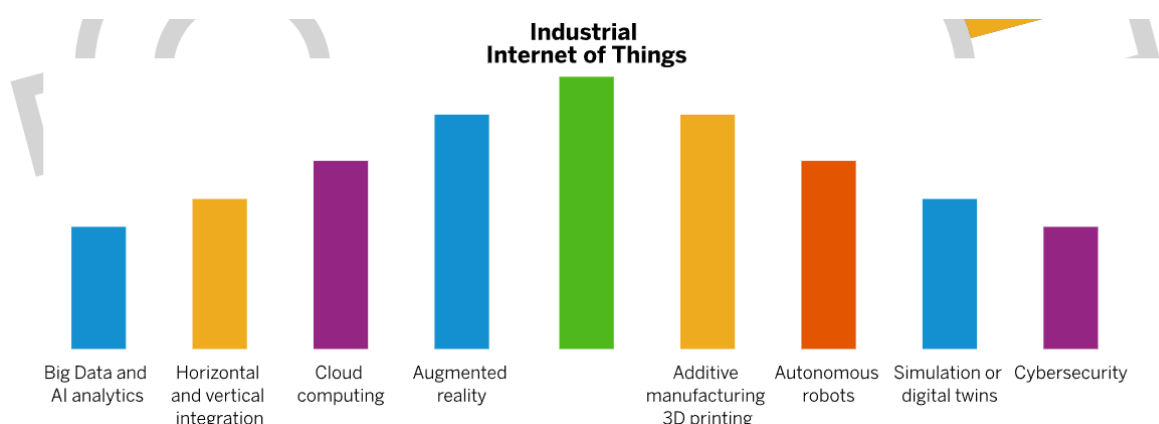


Figura 2.2.2: Tecnologías de la Industria 4.0.

La Industria 4.0, impulsada por tecnologías como el Internet Industrial de las Cosas (IIoT), está transformando la fabricación y la gestión empresarial. La recopilación y análisis de Big Data, potenciados por la inteligencia artificial (IA), permiten una toma de decisiones más eficiente y automatizada en todos los aspectos de la cadena de suministro y la producción. La integración horizontal y vertical conecta todos los procesos, desde la planta de producción hasta los departamentos de I+D y ventas, optimizando las operaciones y reduciendo los silos de datos. La computación en la nube sirve como el pilar de la transformación digital, facilitando la comunicación en tiempo real entre sistemas ciberfísicos y proporcionando la base para la innovación. Además, tecnologías como la realidad aumentada (AR), la fabricación aditiva, los robots autónomos y los gemelos digitales están revolucionando la forma en que se fabrican y gestionan los productos. Sin embargo, la ciberseguridad es fundamental en este entorno conectado, y se utilizan tecnologías avanzadas como el machine learning y el blockchain para garantizar la protección de los datos y la continuidad de la producción (SAP, 2022).

2.2.1 Internet Industrial de las Cosas (IIoT)

El Internet Industrial de las Cosas (IIoT) es una red de dispositivos autónomos conectados a través de Internet, diseñada específicamente para aplicaciones industriales. Esta tecnología permite la recopilación de datos, análisis y optimización de procesos en entornos de fabricación y prestación de servicios, lo que conduce a una mayor eficiencia y reducción de costos. Las aplicaciones del IIoT se enfocan principalmente en sectores como manufactura, transporte y energía, con una inversión significativa a nivel mundial que se espera que se duplique para 2025. Se anticipa que la adopción del IIoT resultará en la implementación de más robots industriales, sistemas de control de almacenes y transporte, así como sistemas de mantenimiento predictivo. A diferencia del Internet de las Cosas (IoT), que se centra en servicios para consumidores, el IIoT se enfoca en mejorar la seguridad y eficiencia en entornos de producción industrial (Iberdrola, 2023).

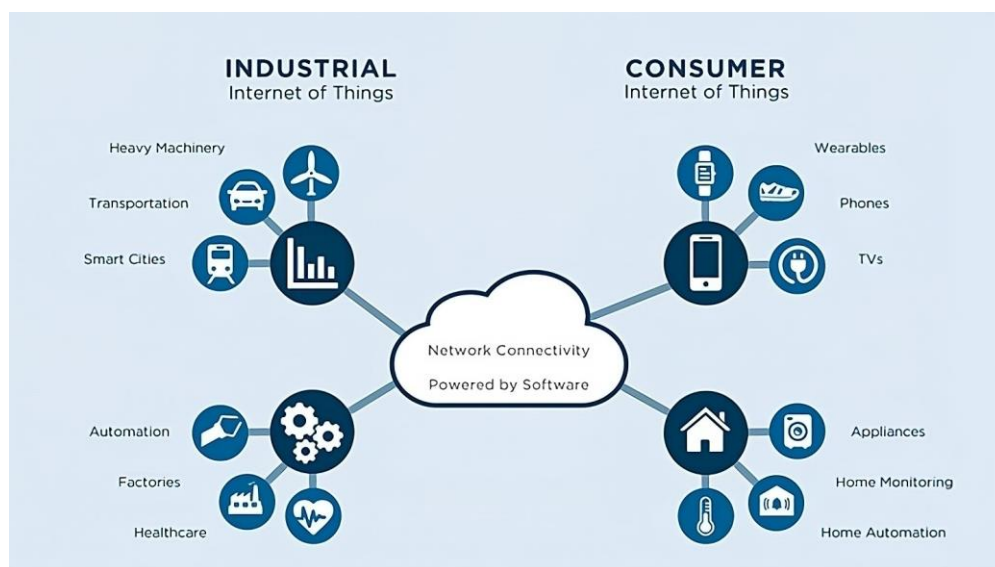


Figura 2.2.3: Comparación entre IIoT e IoT.

Los seis principales beneficios de la Internet Industrial de las Cosas (IIoT) (SAP, 2021):

1. **Mayor agilidad empresarial:** La red IIoT facilita la rápida recopilación, análisis y aprendizaje de datos en tiempo real, lo que permite a las empresas responder de manera ágil a oportunidades y riesgos. Además, los dispositivos IIoT pueden recibir instrucciones basadas en análisis de datos para adaptar y optimizar sus flujos de trabajo automatizados.

2. **Mantenimiento predictivo para máquinas más saludables:** Los dispositivos y máquinas conectadas a la red IIoT transmiten datos continuamente, lo que permite el uso de algoritmos de IA y machine learning para obtener información estratégica sobre las necesidades de mantenimiento. Esto puede reducir significativamente el tiempo de inactividad de la máquina y aumentar su vida útil.
3. **Mayor eficiencia operativa:** La aplicación de analíticas avanzadas a los datos de IIoT proporciona recomendaciones para actualizar procesos y optimizar flujos de trabajo, lo que resulta en una mayor eficiencia y productividad.
4. **Gestión de inventario más inteligente:** Los dispositivos IIoT conectan almacenes, inventarios y redes de entrega, proporcionando a los gerentes de la cadena de suministro una visión en tiempo real de la ubicación de los inventarios. Esto permite una logística más fluida y una gestión de inventario más eficiente.
5. **Seguridad mejorada para los trabajadores:** Los dispositivos de IoT en el lugar de trabajo pueden reducir el riesgo de lesiones mediante la emisión de advertencias y la monitorización de la interacción física con máquinas y dispositivos. Además, pueden ayudar a desarrollar nuevos flujos de trabajo más seguros con el tiempo.
6. **Mejor servicio al cliente:** La integración de la experiencia y la entrada del cliente a través de redes IIoT resulta en experiencias de compra más fluidas, logística personalizada y la capacidad de incorporar el feedback del cliente en la fabricación y desarrollo de productos. Esto conduce a un modelo de negocio más competitivo y resiliente.

Los riesgos y desafíos asociados con el uso de IIoT son principalmente de seguridad. Una preocupación importante es que muchos dispositivos IIoT continúan utilizando contraseñas predeterminadas incluso después de su implementación, lo que facilita a los atacantes interceptar datos o tomar el control de estos dispositivos para lanzar ataques. Además, la transmisión de datos no cifrados también representa una vulnerabilidad. La seguridad y la administración de dispositivos son desafíos clave para las organizaciones, que deben implementar estrategias efectivas para identificar y gestionar dispositivos IIoT de manera segura. La gestión de parches también es crucial, ya que los fabricantes lanzan actualizaciones periódicas de firmware, y las organizaciones necesitan herramientas eficientes para verificar y actualizar los dispositivos sin interrumpir las operaciones (Posey, 2024).

2.3 Diseño Electrónico.

El diseño electrónico es una disciplina fundamental en la ingeniería que se enfoca en la creación y desarrollo de sistemas electrónicos para una amplia gama de aplicaciones. Esta disciplina no solo se limita a resolver problemas técnicos, sino que también fomenta la operatividad, la creatividad y la inventiva del diseñador electrónico. Se trata del arte de crear, transformar o resolver problemas dentro del campo de la electrónica (Wikipedia , s.f.).

El proceso de Diseño y Desarrollo Electrónico abarca tres aspectos fundamentales de la tecnología: el *hardware*, que comprende todos los elementos relacionados con las tarjetas electrónicas, los circuitos impresos o PCB, así como los componentes y accesorios electrónicos; el *firmware*, que consiste en las instrucciones o programas de nivel muy bajo que típicamente se encuentran en microprocesadores, microcontroladores o sistemas embebidos, a los cuales el usuario común no puede acceder ni modificar; y el *software*, que son los programas residentes en dispositivos como computadoras, teléfonos inteligentes, tabletas, entre otros .

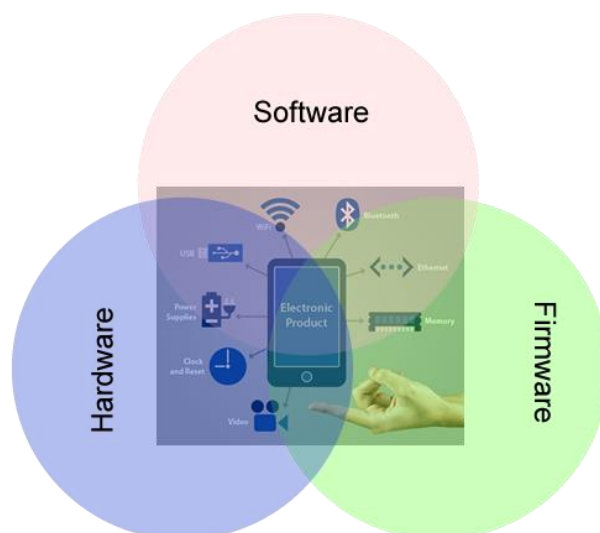


Figura 2.3.1: Diagrama general de diseño electrónico.

El diseño electrónico se basa en principios fundamentales de la electrónica, incluyendo la teoría de circuitos, el análisis de señales, mediciones eléctricas, la electrónica digital y analógica, y la teoría de control. Además, requiere un sólido conocimiento de componentes electrónicos pasivos e integrados, semiconductores y dispositivos de potencia, además de habilidades en el diseño de PCB.

2.4 Estándar IPC

La organización IPC fue establecida en los Estados Unidos en 1957 bajo el nombre de "Institute of Printed Circuits". Aunque ha mantenido su acrónimo, su nombre oficial actual es "Association Connecting Electronics Industries" (Asociación de Industrias Electrónicas del Conexionado). Se trata de una entidad global que establece directrices y estándares para el diseño, fabricación y ensamblaje de productos electrónicos. Estas normativas son ampliamente reconocidas en la industria y sirven como referencia para garantizar la calidad, confiabilidad y compatibilidad de los productos electrónicos en todo el mundo (Salestarrak Deusto , 2021).



Figura 2.4.1: Logotipo IPC.

Los fabricantes de equipos originales (OEM), así como los fabricantes de placas de circuito impreso y componentes, junto con los diseñadores de PCB, deben cumplir con diversas normativas, entre las que se incluyen las normativas IPC. Estas normativas de la industria tienen como objetivo garantizar la fiabilidad y la capacidad de fabricación de PCB y otros componentes electrónicos. Sin importar el sector en el que operen, las normativas IPC regulan tanto el diseño como la fabricación de productos electrónicos (Peterson, 2021).

2.4.1 Beneficios de Uso del Estándar IPC

Las normativas IPC son de carácter voluntario, sin embargo, su aplicación puede mejorar significativamente la calidad del producto y contribuir a su robustez, confiabilidad y durabilidad. Asimismo, el uso de normativas IPC puede agilizar el proceso de diseño y fabricación, reduciendo costos y aprovechando la experiencia acumulada en la industria (330ohms, 2021).

Al adherirse a las normativas IPC durante el diseño, se pueden obtener los siguientes beneficios:

- Adopción de las mejores prácticas de la industria y satisfacción de sus requisitos.
- Prevención de malentendidos entre fabricantes y usuarios.

- Facilitación del intercambio de información.
- Mejora continua de los productos.
- Reducción de los tiempos de desarrollo.
- Optimización de los procesos.
- Diseño orientado a la fabricación y al medio ambiente.
- Aceleración del tiempo de lanzamiento al mercado.

2.4.2 Clasificación de Estándar IPC

Estas normativas IPC establecen pautas y criterios para el diseño, fabricación y ensamblaje de productos electrónicos, garantizando su calidad, fiabilidad y compatibilidad a nivel mundial, a continuación, se presenta el listado de clasificación del estándar IPC (iPCB Circuits Limited, s.f.), (John, s.f.).

- **IPC Clase 1:** Asignado a placas de circuito general con vida útil limitada y función simple, este nivel incluye productos que requieren funciones de componentes básicas. Para los tableros de Clase 1, los defectos de apariencia no afectan la función del tablero, y la fiabilidad del producto no es un factor crítico.

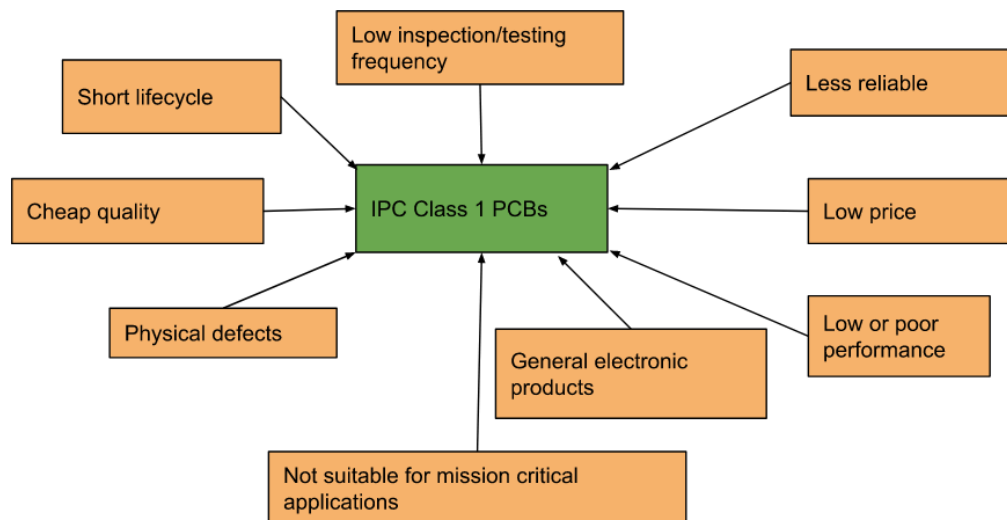


Figura 2.4.2: Características de la PCB clase 1 (Class 1) IPC.

Ejemplos de aplicaciones incluyen controles remotos de televisión, luces LED, juguetes para niños, entre otros. Aunque estas placas son las más económicas de la industria, tienen una esperanza de vida limitada.

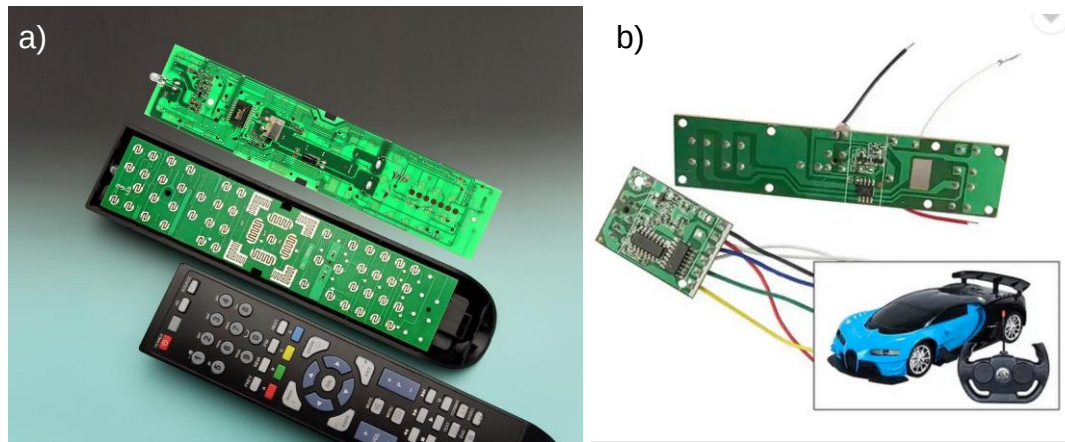


Figura 2.4.3: Ejemplos de PCB Clase 1, a la derecha (a) una PCB de un control remoto infrarrojo, a la izquierda (b) una PCB de juguete a radio control.

- **IPC Clase 2:** Los productos de Clase 2 requieren un funcionamiento continuo y una larga vida útil, pero los requisitos no son tan estrictos como en Clase 3. Estos productos no están expuestos a condiciones ambientales extremas y no deberían experimentar fallas debido al entorno de uso. Aunque se mantienen estándares más estrictos que en Clase 1, se permiten algunos defectos de apariencia. Destinada a equipos electrónicos de servicio específico con una vida útil más larga, como televisores, computadoras, dispositivos móviles, tarjetas de desarrollo, entre otros, esta clasificación es la más utilizada.

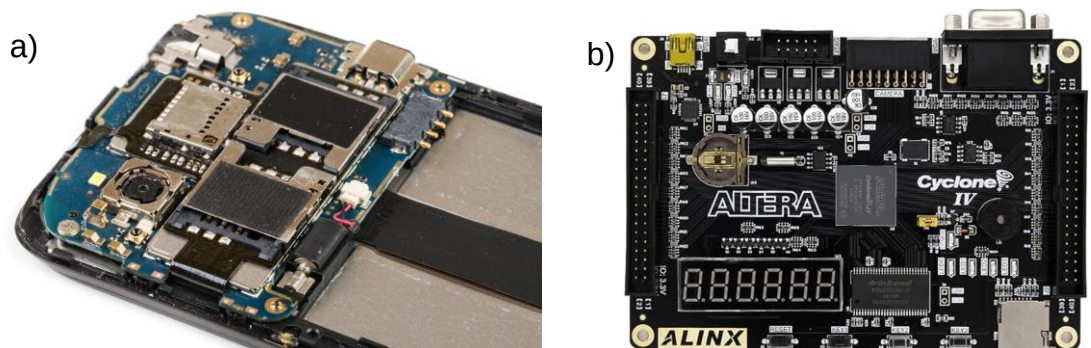


Figura 2.4.4: Ejemplos de PCB clase 2, a la derecha (a) una PCB de un teléfono móvil, a la izquierda (b) una PCB de tarjeta de desarrollo FPGA.

- **IPC Clase 3:** Diseñada para productos de alto rendimiento continuo o bajo demanda, donde el tiempo de inactividad no es tolerado y el entorno de uso puede ser extremadamente desafiante. Estos productos deben funcionar de manera confiable en condiciones críticas. Las placas de Clase 3 son inspeccionadas y probadas

Figura 2.4.5: Ejemplos de PCB clase 3, a la izquierda (a) una PCB de automóvil eléctrico Medel 3 de Tesla Motors, a la izquierda (b) un dispositivo médico para medición de presión arterial.

-

Figura 2.4.6: Ejemplo de PCB clase 4, a la izquierda (a) una PCB de grado militar de una aeronave, a la derecha (b) una tarjeta de vuelo de un satélite espacial CubeSat.

Tabla 2: Resumen de clasificación de PCB de acuerdo con normativa IPC.

	IPC Clase 1	IPC Clase 2	IPC Clase 3	IPC 6012 3/ Clase A
Categoría	Productos electrónicos generales	Productos electrónicos de servicio dedicado	Productos electrónicos de alta confiabilidad	Aviónica espacial y militar
Ciclo de Vida	Corto plazo	Mediano plazo	Largo plazo	Largo plazo
Calidad	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Ejemplo de Uso	Controles remotos de televisión, luces LED, juguetes	Equipos electrónicos como tarjetas de desarrollo, computadoras.	Equipos de soporte vital, sistemas de vehículos.	Equipos aeroespaciales, sistemas militares aerotransportados

Las placas de circuito impreso de Clase 3 se caracterizan por tener tolerancias de fabricación más rigurosas y requisitos de confiabilidad más exigentes en comparación con las placas de Clase 1 y Clase 2. Generalmente, el diseño de una placa de circuito de Clase 1 puede ser realizado por alguien que no sea un diseñador profesional, ya que se trata de productos con funcionalidades básicas y vida útil limitada. Por otro lado, los productos más complejos suelen construirse siguiendo los estándares de Clase 2 o Clase 3, donde se requiere un funcionamiento continuo y una mayor durabilidad (Zachariah, 2021).

Las normas más utilizadas en la industria son la IPC-A-600, IPC-A-610 y IPC-2221, estas son fundamentales para garantizar la calidad y fiabilidad de los productos electrónicos. La IPC-A-600 establece criterios para evaluar la calidad de tableros impresos, la IPC-A-610 define requisitos para la inspección visual de ensamblajes electrónicos, y la IPC-2221 ofrece directrices para el diseño de circuitos impresos, contribuyendo a la creación de productos eficientes y confiables. Sin embargo, es importante destacar que el cumplimiento riguroso de estas normas no solo asegura la calidad del producto final, sino que también optimiza los procesos de fabricación y reduce los costos asociados.

En el ANEXO A se muestra el árbol completo de todas las normas IPC existentes y cómo se relacionan entre sí, lo que proporciona una visión estructurada y detallada del panorama normativo en la industria electrónica (Matric Group , 2022).

2.4.3 IPC-A-600

Antes de proceder con el ensamblado de circuitos impresos, es esencial garantizar el control de calidad del PCB, siguiendo las directrices establecidas por las normas IPC 600. Esto es crucial ya que cualquier inspección, revisión, evaluación o reparación posterior de las tarjetas electrónicas, así como el propio proceso de ensamblaje, pueden resultar considerablemente complicados si no se ha llevado a cabo un control de calidad adecuado bajo criterios de aceptación y rechazo de control de calidad. A continuación, se lista un resumen de los criterios de inspección de PCB de acuerdo con la IPC-A-600 (Laverde, 2020).

1. Áreas de contacto no soldadas:

Se refiere a áreas específicas en la placa de circuito impreso que deben mantenerse libres de soldadura u otros residuos contaminantes, ya que están destinadas a ser utilizadas para la conexión mecánica de componentes, como tornillos para fijar la PCB a la caja o carcasa.

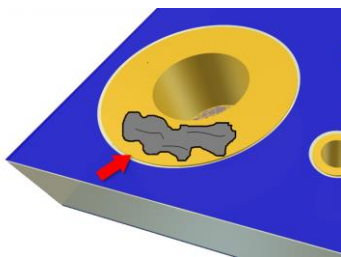


Figura 2.4.7: Área de contacto contaminada en la PCB.

2. Ampollas y delaminación:

Las ampollas y delaminación en una placa de circuito impreso suelen ser consecuencia de debilidades en el material de laminado o errores en el proceso de fabricación. Aunque son aceptables siempre y cuando no sean conductivas, es importante tener en cuenta que las burbujas o la delaminación no deben exceder el 50% de la distancia entre los conductores en la PCB.

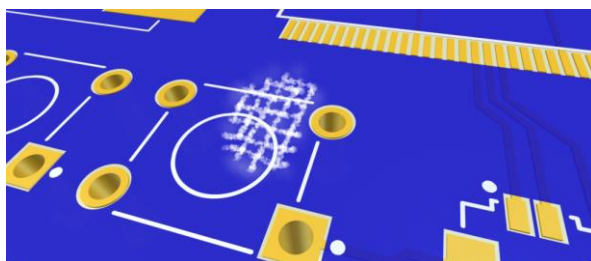


Figura 2.4.8: Delaminación en una PCB.

3. Aréolas:

Las aréolas son una condición en el laminado de una placa de circuito impreso causada por la presión ejercida durante el mecanizado, como el contacto de tornillos. Se considera un defecto si la distancia entre la aréola y el elemento conductor es menor de 0.1 mm.

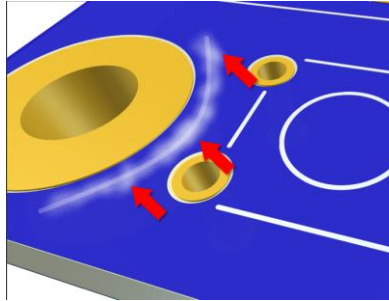


Figura 2.4.9: Delaminación en una PCB.

4. Delaminación, muescas, grietas:

La delaminación, las muescas y las grietas son condiciones no deseadas que pueden ocurrir en una placa de circuito impreso. La delaminación se refiere a la separación entre capas del laminado, que supera los 0,25 mm, lo que puede reducir el espacio disponible para los conductores. Las muescas son pequeñas incisiones o cortes en el borde del laminado, mientras que las grietas son fracturas que se forman en esta misma área del material. Estas imperfecciones comprometen la integridad estructural de la PCB y pueden afectar su funcionamiento normal.

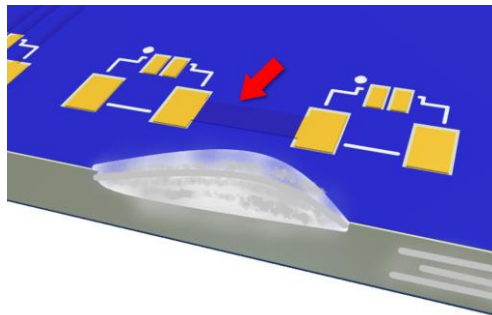


Figura 2.4.10: Muesca en una PCB.

5. Quemaduras:

Las quemaduras en una tarjeta se refieren a evidencias de daños causados por calor excesivo, lo que puede resultar en desprendimientos y daños posteriores en la placa de circuito impreso.

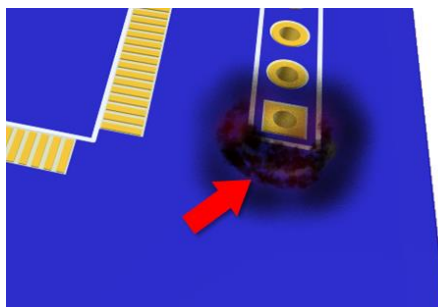


Figura 2.4.11: Quemadura en una PCB.

6. Depanelización:

La depanelización se refiere a defectos en los bordes del laminado de una placa de circuito impreso, que pueden manifestarse como bordes ásperos, dañados, deshilachados, con rebabas o muescas. Estos defectos son el resultado de la separación del panel y pueden sobresalir, afectando la forma, el ajuste y la función de la placa durante las tareas de ensamblaje posterior.

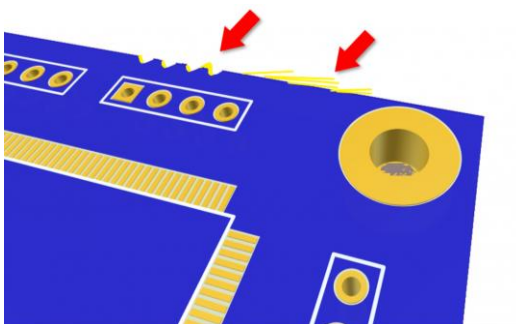


Figura 2.4.12: Muecas no deseadas en una PCB panelizada.

7. Conductores/pistas-reducción:

Los defectos de reducción en los conductores o pistas de una placa de circuito impreso son problemas de fabricación que afectan la integridad de las pistas conductoras.

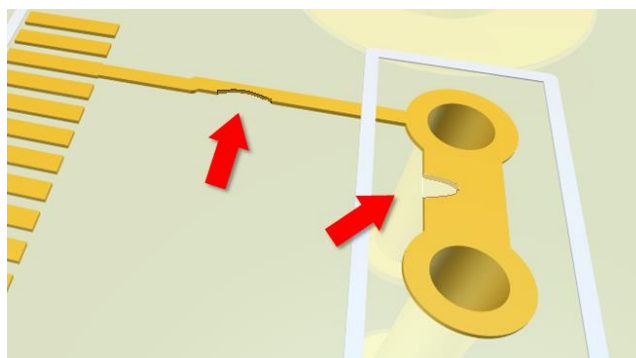


Figura 2.4.13: Reducción no deseadas de pistas en una PCB.

Estos defectos pueden incluir muescas, orificios, bordes rugosos, rasguños u otras imperfecciones que pueden interferir con la corriente que circula a través de ellas o afectar la impedancia en frecuencias de radiofrecuencia (RF). Por lo general, estos problemas son causados por contaminación durante el proceso de fabricación de la PCB.

8. Conductores/Pistas-levantados:

Los conductores o pistas levantados en una placa de circuito impreso se refieren a la separación entre un pad y el laminado que es mayor que el espesor de la propia pista. Esto puede resultar en vías separadas o levantadas. Por lo general, este problema es causado por presión mecánica o térmica durante el proceso de fabricación o montaje. Como consecuencia, el pad puede desprenderse total o parcialmente de la superficie de la PCB, lo que puede afectar negativamente la integridad del circuito y la funcionalidad del dispositivo electrónico.

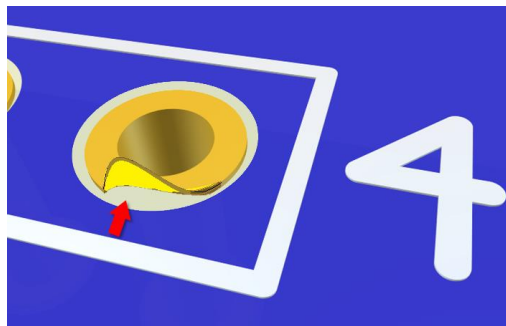


Figura 2.4.14: Conductor levantado en PCB.

9. Marcado-serigrafía:

El marcado por serigrafía en una placa de circuito impreso se refiere al proceso de agregar leyendas, símbolos u otra información identificativa en la superficie de la placa mediante serigrafía. Los problemas asociados con el marcado por serigrafía incluyen la ausencia de marcado, marcado borroso, ilegible, duplicado o manchado.

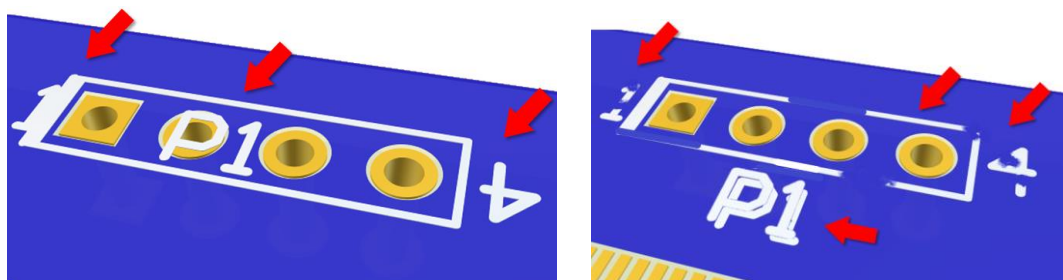


Figura 2.4.15: Serigrafía sobrepuesta en pads y serigrafía dañada.

10. Mascara de Soldadura:

La máscara de soldadura es un recubrimiento utilizado en las placas de circuito impreso para proteger áreas específicas durante el proceso de soldadura. Los problemas asociados con la máscara de soldadura incluyen grietas, arrugas y ampollas en el recubrimiento, que pueden resultar en puentes de soldadura no deseados.

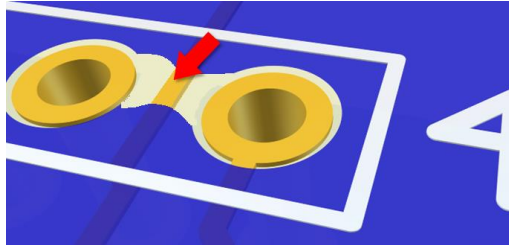


Figura 2.4.16: Mascara de soldadura desprendida en una PCB.

Además, la presencia de partículas sueltas de antisolder o máscara de soldadura desprendida puede afectar negativamente el circuito, causando cortocircuitos o interferencias en la conductividad eléctrica.

11. Pandeo y torcedura:

El pandeo y la torcedura en placas de circuito impreso (PCB) pueden ocasionar daños significativos durante el ensamblaje y la operación del dispositivo. La tensión generada por el pandeo y la torcedura puede provocar la fractura de conexiones eléctricas o dañar los componentes montados en la placa.

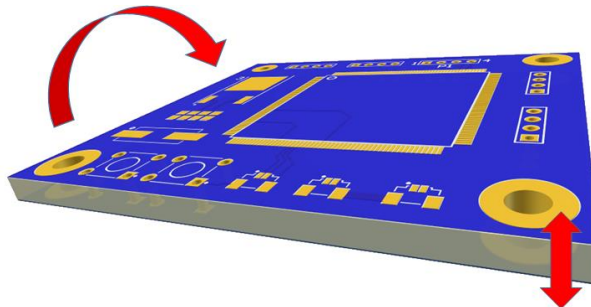


Figura 2.4.17: PCB pandeada.

Este problema puede dificultar especialmente el ensamblaje automatizado de montaje superficial (SMT), ya que los componentes, como los de montaje en superficie (SMD) tipo QFP, QFN o BGA, requieren una superficie plana para una correcta colocación y soldadura.

2.4.4 IPC-A-610

La IPC-A-610, conocida como la Especificación de Aceptación de Calidad de Ensamblajes Electrónicos, es un estándar internacionalmente reconocido que establece los criterios y requisitos para la inspección visual de los ensamblajes electrónicos. Esta norma define los criterios de aceptabilidad para componentes electrónicos y conexiones soldadas en una variedad de productos, desde dispositivos electrónicos de consumo hasta equipos industriales y aeroespaciales. La IPC-A-610 proporciona directrices detalladas sobre lo que se considera aceptable en términos de condiciones de superficie, conexiones de soldadura, montaje de componentes, entre otros aspectos, y ayuda a garantizar la calidad y confiabilidad de los productos electrónicos durante todo su ciclo de vida (André, 2020).

- **Criterios de Aceptación IPC-A-610**

Para evaluar o inspeccionar visualmente un ensamble, se usan los criterios de aceptación IPC 610, estos se pueden presentar en cuatro condiciones: ideal, aceptable, indicador de proceso, defecto (Laverde, 2020).



Figura 2.4.18: Soldadura ideal.

Ideal: Se refiere a un estado del ensamblaje que se aproxima a la perfección, altamente deseado, aunque en ocasiones puede resultar difícil de lograr debido a la necesidad de controlar con precisión múltiples variables como la temperatura, los insumos, la maquinaria, la destreza y el entrenamiento. Aunque alcanzar este estado puede no ser absolutamente necesario para garantizar la



Figura 2.4.19: Soldadura aceptable.

Aceptable: Se refiere a un estado que, aunque no alcanza la perfección, aún garantiza la fiabilidad del ensamblaje y mantiene sus características óptimas durante su vida útil.



Figura 2.4.20: Defecto irregular.

Defecto: Se refiere a una condición que afecta la fiabilidad de un ensamblaje, como una soldadura irregular o un componente que no se ajusta correctamente. Puede afectar el funcionamiento esperado y se puede reparar, retrabajar, dejar tal como está o desechar, según las decisiones del cliente. En caso de duda, se puede ofrecer asesoramiento al cliente para tomar una decisión adecuada.



Indicador de proceso: Es un criterio que no se considera un defecto, pero que proporciona información sobre el proceso de fabricación. Puede señalar posibles mejoras en los materiales, herramientas, maquinaria o habilidades del operador.

Figura 2.4.21: Daño en pad PCB.

Estos son muy útiles para la mejora de procesos, es decir cuando se implementa acciones de planificación, implementación y evaluación de procesos, para elevar la calidad de un proceso de producción, o cuando se usa control estadístico de la calidad.

- **Criterios de aceptación de soldadura SMD con la norma IPC 610 para componentes tipo CHIP (pastillas) o pasivos**

Tabla 3: Criterios de aceptación de soldadura para componentes tipo chip SMD con la IPC 610

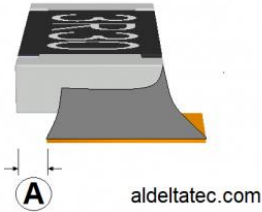
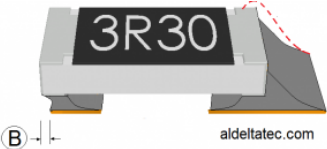
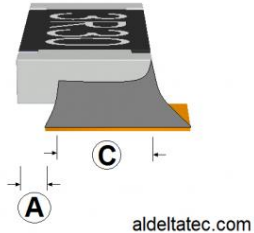
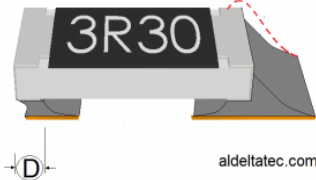
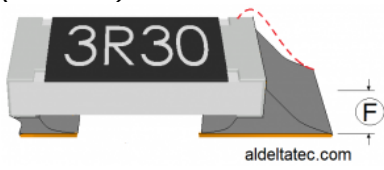
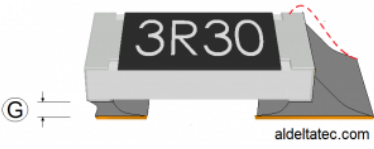
Características	Criterio dimensional	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Desplazamiento máximo lateral. 	A	Menos del 50% del ancho de terminación (terminación metalizada o pin) del componente o el 50% del ancho del pa, lo que sea menor.		Menos del 25% del ancho de terminación del componente o el 25% del ancho del pad, lo que sea menor.
Desplazamiento máximo frontal 	B	No permitido.		
Ancho mínimo de la conexión 	C	El 50% del ancho de terminación del componente o el 50% del pad, lo que sea menor.	El 50% del ancho de terminación del componente o el 50% del pad, lo que sea menor.	El 75% del ancho de terminación del componente o el 75% del pad, lo que sea menor.

Tabla 3 (continuación): Criterios de aceptación de soldadura para componentes tipo chip SMD con la IPC 610

Características	Criterio dimensional	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Longitud mínima de la conexión de lado 	D	Evidencia de mojado/humectación adecuada.		
Altura máxima del filete (menisco, relleno o porción de la soldadura) 	E	La soldadura puede sobresalir del pad, pero no debe tocar la parte no soldada, es decir el cuerpo del componente.		
Altura mínima del filete (menisco) 	F	Evidencia de mojado/humectación adecuada.	Igual al grosor de la soldadura más 25%, o igual al grosor de la soldadura más 0.50 mm (.020 «), el que sea menor.	
Espesor mínimo de la soldadura 	G	Evidencia de apropiado mojado/humectación.		
Traslape mínimo frontal 	J	Se requiere evidencia de alguna superposición.		

- **Criterios de inspección visual dimensional para componentes tipo ala de gaviota (gull wing) IPC 610**

Tabla 4: Criterios de inspección visual dimensional para componentes tipo ala de gaviota IPC 610

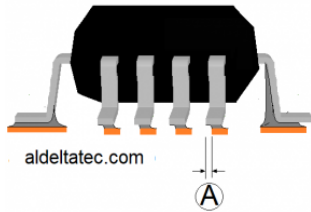
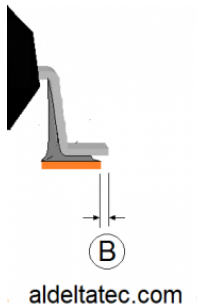
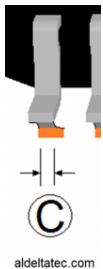
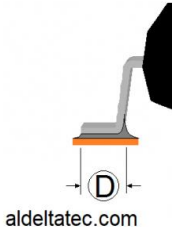
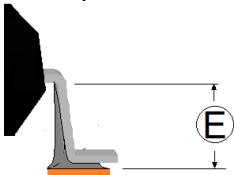
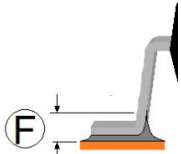
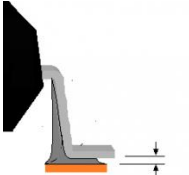
Características	Criterio dimensional	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Desplazamiento máximo lateral. 	A	No más del 50% del ancho del terminal o 0.50 mm (.020 «), lo que sea menor.		No más del 25% del ancho del terminal o 0.50 mm (.020 «), lo que sea menor.
Desplazamiento máximo frontal 	B	La punta de la soldadura (pie o “toe”) es aceptable siempre y cuando no viole el espaciado eléctrico mínimo.		
Ancho mínimo de la conexión 	C	50% del ancho de la terminal o pin del componente.		75% del ancho de la terminal o pin.
Longitud mínima de la conexión de lado 	D	Longitud mínima de la conexión de lado.		

Tabla 4 (continuación): Criterios de inspección visual dimensional para componentes tipo ala de gaviota IPC 610

Características	Criterio dimensional	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Altura máxima del filete (menisco, relleno o porción de la soldadura)  aldeptec.com	E	No hay máximo, pero la soldadura no debe tocar el cuerpo del componente.		
Altura mínima del filete (menisco)  aldeptec.com	F	Evidencia de mojado apropiado	Igual al espesor de la soldadura más 50% del espesor del terminal.	Igual al espesor de la soldadura más 100% del espesor del terminal.
Espesor mínimo de la soldadura  aldeptec.com	G	Evidencia de mojado apropiado		

Las Tablas 2 y 3 presentan los criterios de aceptación de soldadura para componentes SMD y de inspección visual dimensional para componentes tipo ala de gaviota, respectivamente, según la normativa IPC 610. Estos criterios proporcionan directrices detalladas sobre dimensiones, desplazamientos, altura de filete, espesor de soldadura y otros aspectos clave para la evaluación de la calidad de la soldadura y la integridad de los componentes electrónicos en diferentes clases de fabricación (Laverde, Criterios de evaluación de soldadura SMD con IPC 610, 2019).

Capítulo 3. Desarrollo e Implementación

El Capítulo 3 detalla el proceso de desarrollo e implementación del Controlador Lógico Programable (PLC) IIoT, siguiendo la metodología del Modelo V, un enfoque ampliamente reconocido en ingeniería de hardware y sistemas. Representado en la Figura 3.1, el Modelo V comprende dos ramas principales: una para el diseño y otra para la verificación. En el lado izquierdo de la "V", se desglosan los requisitos del sistema desde un nivel alto hasta los detalles de los bloques, mientras que en el lado derecho se enfoca en la integración y verificación para asegurar que cada etapa del diseño se alinee con una fase de prueba específica. Este enfoque sistemático garantiza que las complejidades del diseño se validen con respecto a los requisitos iniciales, asegurando la integridad del diseño a lo largo del ciclo de vida del desarrollo. (HWE Tech & Consulting, s.f.).

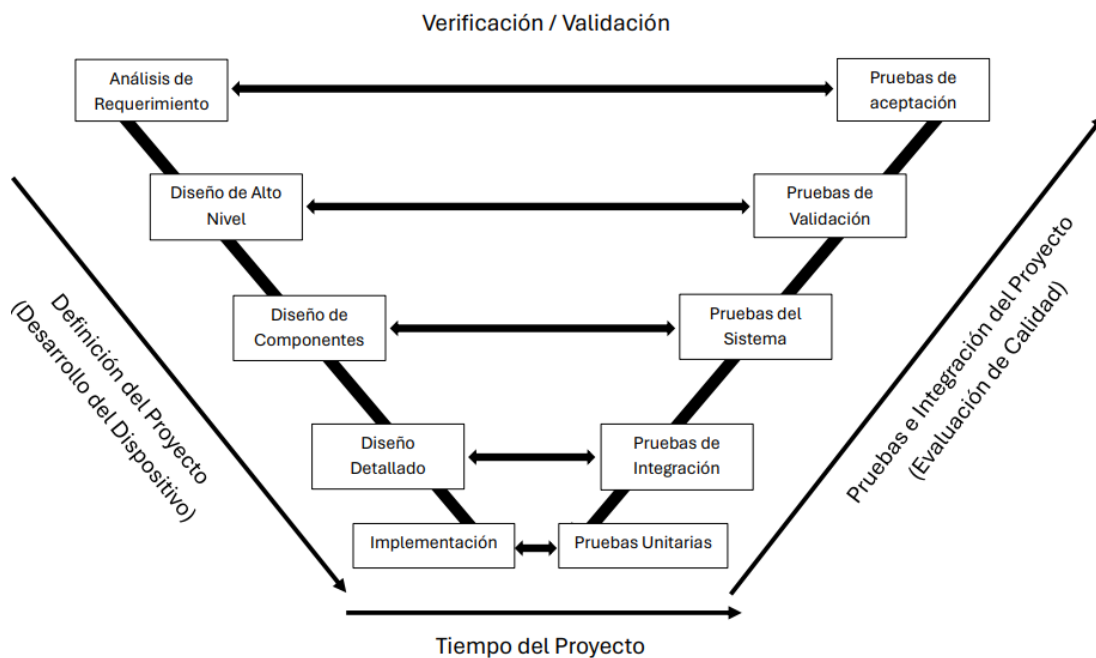


Figura 3.1: Gráfica del modelo V adaptada para el desarrollo de sistemas electrónicos.

Con base en el modelo V, se ha llevado a cabo el desarrollo del dispositivo del Controlador Lógico Programable (PLC) IIoT, siguiendo un enfoque sistemático que abarca desde la identificación de requisitos hasta la implementación y las pruebas. Este enfoque ha permitido asegurar la integridad del diseño y la conformidad con los estándares desde las etapas iniciales hasta la verificación final.

Etapas de Desarrollo [Lado Izquierdo de V]:

- **Análisis de Requerimientos:** Identificación de objetivos, especificaciones y restricciones del PLC, considerando necesidades específicas de conectividad y rendimiento para aplicaciones IIoT.
- **Diseño de Alto Nivel:** Desarrollo de la arquitectura general del sistema en bloques, identificando componentes clave y sus interconexiones.
- **Diseño de Componentes:** Diseño de cada componente/bloques, como entradas digitales y analógicas, salidas digitales, comunicación inalámbrica, entre otros. Se realiza la selección de componentes, diagramas esquemáticos, simulaciones y emulaciones de cada bloque diseñado.
- **Diseño Detallado:** Creación de diagramas detallados, diseño de PCB, firmware y otros elementos, tomando en cuenta normativas IPC. En esta etapa se elaboran los planos y especificaciones técnicas necesarias para la fabricación.
- **Implementación:** Construcción del prototipo, fabricación de PCBs, colocación de componentes, soldadura, ensamblaje mecánico y programación de firmware. Aquí se lleva a cabo la construcción física del dispositivo.

Etapas de Prueba [Lado Derecho de V]

- **Pruebas Unitarias:** Evaluación de funcionalidades específicas del circuito del PLC y unidades de firmware. Esto puede incluir pruebas de funcionamiento de cada bloque individual.
- **Pruebas de Integración:** Evaluación de la correcta interacción entre diferentes componentes/bloques.
- **Pruebas del Sistema:** Verificación integral del sistema, asegurando integración de todos los componentes y firmware en un conjunto coherente.
- **Pruebas de Validación:** Aseguramiento de que el PLC cumpla con los requisitos y especificaciones definidos mediante pruebas funcionales.
- **Pruebas de Aceptación:** Validación de la capacidad del PLC para cumplir con los requerimientos y especificaciones para aplicaciones IIoT.

3.1 Análisis de Requerimientos

El análisis de requerimientos es una etapa crítica en el proceso de diseño de cualquier dispositivo electrónico, incluido el Controlador Lógico Programable (PLC) IIoT. En esta sección, se detallarán los requisitos funcionales y técnicos y restricciones identificados para el PLC IIoT ITA-1600, con el objetivo de definir claramente las necesidades y especificaciones del dispositivo antes de iniciar su diseño y desarrollo.

3.1.1 Requisitos Funcionales:

Los requisitos funcionales del PLC IIoT se centran en las capacidades y funcionalidades que el dispositivo debe ofrecer para cumplir con las expectativas de los usuarios y las demandas del entorno industrial. A continuación, se enumeran los requisitos funcionales identificados:

- **Entrada de Alimentación:** El dispositivo debe ser capaz de recibir energía para su funcionamiento.
- **Salida de Alimentación Aislada:** Se requiere una salida de alimentación aislada para conectar sensores de corriente de manera segura.
- **Entradas Digitales:** Se necesitan entradas digitales para recibir señales digitales de 24VDC.
- **Entradas Analógicas:** Se necesitan entradas analógicas de 0V a 10V DC y entradas analógicas de 4mA a 20mA DC para la adquisición de señales analógicas.
- **Salidas a Relevador:** Se requieren salidas a relevador para controlar dispositivos externos, ya sea de corriente alterna o corriente directa.
- **Salidas Digitales:** Se requieren salidas de 24VDC para el control específico de semáforos industriales.
- **Reloj en Tiempo Real (RTC):** Se necesita un RTC para mantener un registro temporal preciso y proporcionar marcas de tiempo para mediciones y activaciones.
- **Comunicación Inalámbrica:** El dispositivo debe ser capaz de comunicarse de forma inalámbrica a través de Wi-Fi y Bluetooth.
- **Comunicación y Programación:** Se requiere una interfaz serial vía USB para la comunicación y programación del dispositivo.
- **Indicadores Visuales:** Debe integrar indicadores luminosos visuales para corroborar estados lógicos o de funcionamiento interno del PLC.

3.1.2 Requisitos Técnicos

Los requisitos técnicos del PLC IIoT abordan consideraciones específicas de diseño destinadas a garantizar la fiabilidad y el rendimiento del dispositivo. Los requisitos técnicos identificados son los siguientes:

- **Alimentación:** La alimentación del dispositivo se realizará mediante una fuente de alimentación externa montada en un carril DIN, de 24VDC.
- **Salida de Alimentación Aislada:** La salida de alimentación aislada proporcionará el voltaje y la corriente necesarios para alimentar un sensor de corriente, garantizando un aislamiento eléctrico para prevenir interferencias por ruido industrial.
- **Entradas y Salidas Digitales:** Las entradas digitales contarán con aislamiento galvánico mediante optoacopladores y LED indicadores de señal. Las salidas a relé estarán equipadas con diodos antirretorno y LED indicadores de activación.
- **Entradas Analógicas:** Las entradas analógicas estarán protegidas contra polaridad inversa y sobretensión, con filtros de primer orden para eliminar el ruido eléctrico ambiental.
- **Interfaz del Microcontrolador:** El microcontrolador debe tener suficientes pines I/O para manejar todas las entradas y salidas requeridas.
- **Comunicación y Programación:** La programación y comunicación se realizarán vía USB, sujeta a revisión para definir el tipo de USB considerando resistencia y usabilidad.
- **Integración de Tecnologías Inalámbricas:** El dispositivo debe ser capaz de integrar de manera eficiente las tecnologías inalámbricas, como Wi-Fi y Bluetooth, para permitir la comunicación remota y la conectividad con otros dispositivos.
- **Tolerancia a Condiciones Ambientales:** El dispositivo debe ser diseñado para operar de manera confiable en entornos industriales adversos, incluyendo temperaturas de grado industrial, vibraciones y humedad.
- **Protección contra Sobrecorriente y Sobretensión:** Se deben implementar medidas de protección para garantizar que el dispositivo esté protegido contra sobrecargas eléctricas y picos de voltaje que puedan dañar los componentes internos.
- **Protección Antiestática (ESD):** El diseño del dispositivo debe cumplir con las regulaciones y estándares de compatibilidad electromagnética para garantizar que no interfiera con otros equipos electrónicos y que sea inmune a interferencias externas.

- **Compatibilidad con Normativas Industriales:** El diseño del dispositivo debe cumplir con las normativas y estándares relevantes de la industria, incluidas las especificaciones IPC, para garantizar su aceptabilidad y interoperabilidad en entornos industriales.

3.1.3 Restricciones

Las restricciones del diseño del PLC IIoT establecen limitaciones y consideraciones adicionales que deben tenerse en cuenta durante el proceso de diseño y desarrollo del dispositivo. Estas restricciones incluyen:

- **Limitaciones de Costo:** El diseño del PLC IIoT debe cumplir con un presupuesto determinado para materiales y desarrollo, lo que puede influir en la selección de componentes y la complejidad del diseño.
- **Espacio Físico Disponible:** El tamaño y la forma del PLC IIoT deben adaptarse a las limitaciones de espacio del gabinete plástico, lo que puede influir en el diseño de la placa de circuito impreso y la disposición de los componentes, la figura 3.1.1 muestra físicamente el gabinete a utilizar.



Figura 3.1.1: Gabinete plástico a utilizar para utilizar en el PLC IIoT.

- **Tiempo de Desarrollo:** El PLC IIoT debe desarrollarse dentro del plazo determinado para cumplir con los objetivos del proyecto, lo que puede influir en la complejidad del diseño y la disponibilidad de recursos.

Microcontrolador Por Utilizar: El diseño del PLC debe hacerse en base al microcontrolador ESP32 como la unidad central de procesamiento para el dispositivo. El ESP32 ofrece un potente rendimiento con su procesador Tensilica Xtensa LX6 Dual-core a 160MHz, además de capacidades integradas de conectividad Wi-Fi y Bluetooth, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones industriales.

- **Componentes Por Utilizar:** Se deben emplear principalmente componentes de montaje superficial (SMD) en la mayor parte del dispositivo PLC debido a su eficiencia de espacio y rendimiento. Sin embargo, se considerarán componentes de montaje a través del orificio (PTH) para aquellos que sean indispensables debido a su disponibilidad, potencia y empaquetado específico, en la figura 3.1.2 se muestra como es cada montaje en un PCB. Esta combinación asegurará la optimización del diseño en términos de rendimiento, espacio y facilidad de montaje.



Figura 3.1.2: Tecnologías de componentes electrónicos PTH y SMD.

- **Tarjeta de Circuito Impreso (PCB):** El diseño de la tarjeta de circuito impreso debe cumplir con la clasificación IPC clase 2, lo que garantiza altos estándares de calidad y fiabilidad en la fabricación. La PCB será de dos capas para mantener la complejidad del diseño bajo control y facilitar la fabricación y el ensamblaje. Además, se debe prestar especial atención al enrutamiento de señales y a la disposición de los componentes para garantizar un rendimiento óptimo del sistema y una fácil reparación en caso de mantenimiento.

3.2 Diseño de Alto Nivel

El diseño de alto nivel se centra en definir la arquitectura general del sistema y en identificar los componentes clave, así como en establecer sus interconexiones. Aunque no se seleccionan los componentes específicos en esta etapa, se describe qué funciones debe cumplir cada bloque y qué características generales deben tener para proceder después con el diseño detallado de cada bloque. La arquitectura general del sistema se compone de los siguientes bloques principales:

3.2.1 Bloque de Entradas Digitales 24V DC

El bloque de entradas digitales de 24V DC tiene la función de recibir señales digitales de entrada provenientes de sensores, interruptores u otros dispositivos en entornos industriales. Estas entradas permiten al PLC detectar estados lógicos binarios, como "alto" o "bajo", para monitorear y controlar diferentes procesos industriales. La robustez y confiabilidad de este bloque son esenciales para garantizar el funcionamiento adecuado del sistema en condiciones industriales. En la figura 3.2.1 se muestra la representación a bloques general de las entradas digitales.

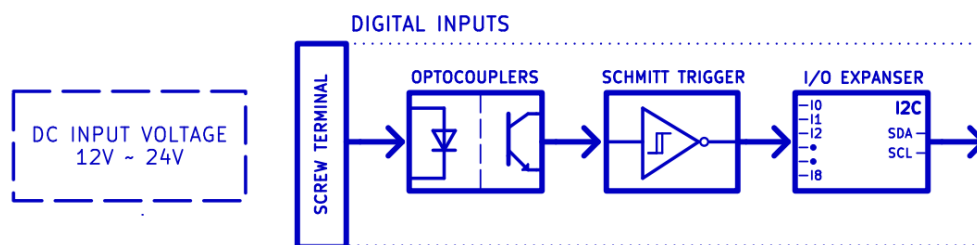


Figura 3.2.1: Diagrama de bloques de las entradas digitales del PLC.

El bloque de estradas digitales se compone de 3 componentes principales, Optoacopladores, compuertas Schmitt Trigger, Expansor E/S:

- **Optoacopladores:**

El componente electrónico principal del bloque de entradas digitales es el optoacoplador. La configuración elemental de un optoacoplador, también denominado optoaislador, implica un diodo emisor de luz (LED) que genera luz infrarroja y un semiconductor fotosensible que detecta la radiación infrarroja emitida, la figura 3.2.2 muestra el símbolo y apariencia física del optoacoplador.

Tanto el LED como el dispositivo fotosensible se encuentran encapsulados en un cuerpo o envoltura que protege contra la luz, con terminales metálicos para las conexiones eléctricas (ElectronicsTutorials, 2014).

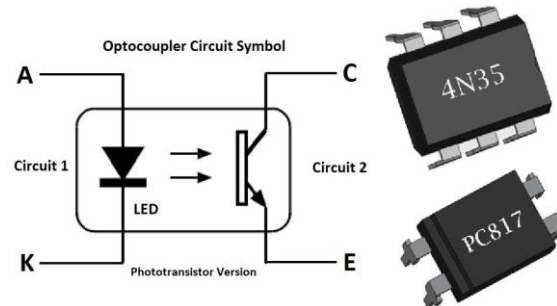


Figura 3.2.2: Símbolo esquemático y apariencia física de un optoacoplador.

Un optoacoplador (también llamado optoaislador) es un dispositivo semiconductor que permite la transmisión de una señal eléctrica entre dos circuitos aislados. Un optoacoplador consta de dos partes: un LED que emite luz infrarroja y un dispositivo fotosensible que detecta la luz proveniente del LED. Ambas partes se encuentran contenidas dentro de una caja negra con pines para la conectividad, ver figura 3.2.3 que muestra diagrama interno. El circuito de entrada recibe la señal entrante, ya sea que esta sea de corriente alterna (AC) o corriente continua (DC), y utiliza la señal para encender el LED (Tung, s.f.).

- **Schmitt Trigger:**

El Schmitt Trigger es un componente crucial en el diseño de las entradas digitales de un PLC. Se utiliza para garantizar una transición de estado limpia y estable, especialmente en presencia de señales ruidosas o fluctuantes. En el contexto de señales de alta velocidad, el Schmitt Trigger juega un papel fundamental al proporcionar una respuesta robusta y confiable a las fluctuaciones de voltaje que podrían presentarse en las señales de entrada, la figura 3.2.3 muestra el símbolo esquemático (Dejan, s.f.).

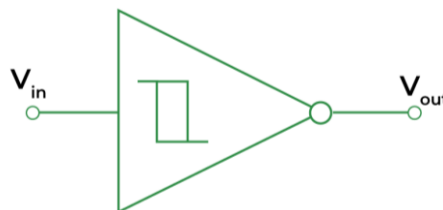


Figura 3.2.3: Símbolo de compuerta NOT con Schmitt Trigger.

El Schmitt Trigger aborda estos problemas al establecer un nivel de histéresis, lo que significa que el cambio de estado de salida solo ocurre después de que la señal de entrada ha superado un umbral específico y se ha mantenido estable por un cierto período de tiempo, en la figura 3.2.4 muestra gráficamente el oscilograma donde el umbral alto aproximadamente a 1.9 V y el umbral bajo a unos 1.3 V, la salida es limpia cuadrada.

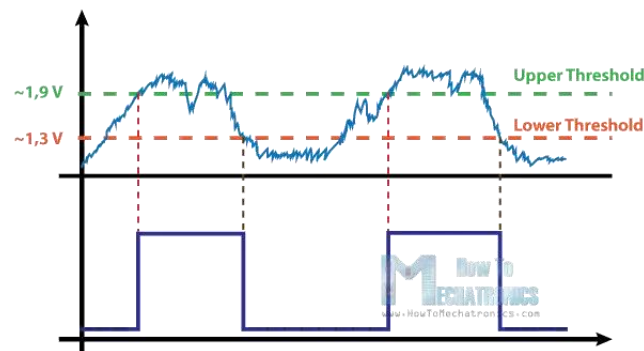


Figura 3.2.4: Oscilograma donde se establecen dos umbrales y salida cuadrada.

- **Expansor E/S:**

El Expansor E/S (Entrada/Salida) se utiliza como una solución para aumentar el número de pines disponibles para conectar dispositivos de entrada y salida al PLC. En este caso particular, se implementa un expansor debido a que el microcontrolador ESP32 no cuenta con suficientes pines para todas las conexiones necesarias en el sistema. El expansor E/S actúa como una extensión de los pines disponibles en el microcontrolador ESP32, permitiendo así una mayor flexibilidad en el diseño y la conectividad de los dispositivos periféricos al PLC.

Los expansores E/S trabajan con comunicación I2C, el cual es un protocolo de comunicación serial síncrono que permite la comunicación entre varios dispositivos a través de solo dos cables: un cable de datos (SDA) y un cable de reloj (SCL), como se muestra en la figura 3.2.5.

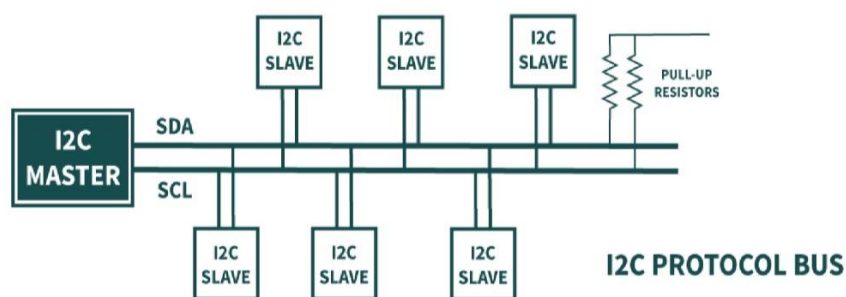


Figura 3.2.5: Comunicación entre varios dispositivos por medio de bus I2C.

El bus I2C es un sistema de bus maestro-esclavo, lo que significa que puede haber varios dispositivos esclavos conectados a un solo bus controlado por un maestro. Cada dispositivo esclavo tiene una dirección única en el bus, lo que permite al maestro seleccionar y comunicarse con un dispositivo específico enviando su dirección junto con los datos

3.2.2 Bloque de Entradas Analógicas 0V~10V DC

El bloque de Entradas Analógicas 0V~10V DC tiene la función de adquirir señales analógicas provenientes de sensores, medidores u otros dispositivos en entornos industriales. Estas entradas permiten al PLC capturar y procesar información analógica con una precisión adecuada para monitorear y controlar diversos parámetros en procesos industriales. En la figura 3.2.6 se muestra la representación a bloques general de las entradas analógicas.

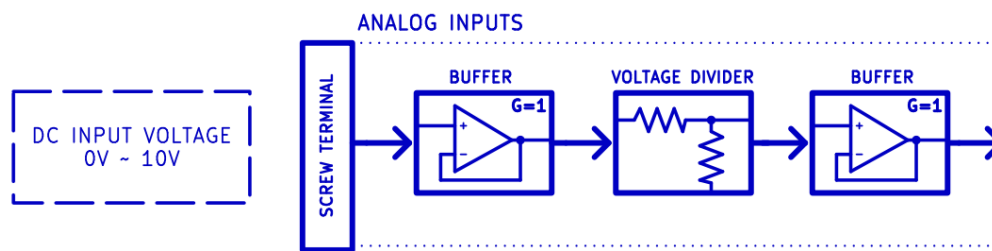


Figura 3.2.6: Diagrama de bloques de las entradas analógicas del PLC.

El bloque de entradas analógicas se compone de tres bloques, buffer de entrada, divisor de voltaje y buffer de salida.

- **Buffer de Entrada:**

El bloque del buffer de entrada es fundamental en el proceso de adquisición de señales analógicas. Su principal función es mantener una entrada de alta impedancia para no afectar la salida del sensor analógico de 0V~10V DC conectado al PLC. Esto garantiza una correcta lectura de la señal sin distorsiones ni pérdidas de precisión.

Cuando un amplificador operacional se utiliza como búfer, proporciona una impedancia de entrada muy alta y una impedancia de salida baja. Además, dado que el amplificador operacional se usa con la retroalimentación negativa (en la región lineal), el voltaje en el terminal inversor y no inversor será el mismo. ($V_+ = V_-$), la figura 3.2.7 muestra la conexión.

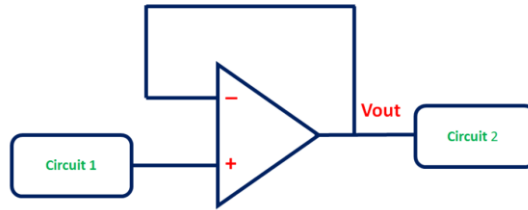


Figura 3.2.7: El amplificador operacional como búfer se puede utilizar para aislar dos circuitos.

El circuito del búfer opera con una relación directa entre la salida (V_o) y la entrada (V_{in}). Esto implica que la señal de salida del amplificador operacional sigue exactamente la señal de entrada. En este diseño, la ganancia del amplificador operacional es de 1, lo que lo convierte en un seguidor de unidad. Gracias a su alta impedancia de entrada y baja impedancia de salida, el búfer puede separar efectivamente las dos etapas del circuito mientras permite que la salida de un circuito se convierta en la entrada de otro (ALL ABOUT ELECTRONICS, 2020).

- **Divisor de Voltaje:**

El bloque de divisor de voltaje desempeña un papel crucial al convertir el rango de voltaje de 0V10VDC a un voltaje compatible con la lógica del microcontrolador, que generalmente opera en un rango de 0V3.3V. Este bloque divide la señal de entrada de manera proporcional, permitiendo al microcontrolador interpretar con precisión la información analógica recibida. Un divisor de voltaje requiere que se conecte una fuente de voltaje a través de dos resistencias en serie (5Hertz, s.f.).

La ecuación establece que el voltaje de salida es directamente proporcional al voltaje de entrada y a la razón entre R_1 y R_2 , ver figura 3.2.8. (JIMBLON, s.f.).

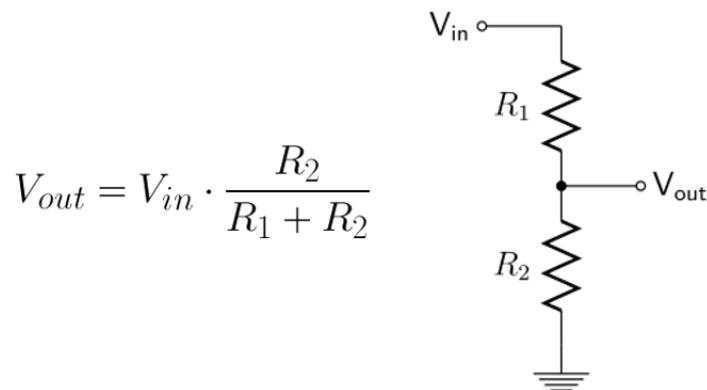


Figura 3.2.8: Ecuación de divisor de voltaje y diagrama esquemático de divisor de voltaje.

3.2.3 Bloque de Entradas de Corriente 4-20mA DC

El bloque de entradas de corriente 4-20mA DC tiene la función de medir con precisión la corriente en un lazo de control industrial. Esta entrada permite al PLC monitorear y controlar procesos que requieren mediciones precisas de corriente en un rango estándar de 4-20mA. La figura 3.2.9 muestra una representación de bloques del sistema, donde se detalla la conexión de las entradas de corriente.

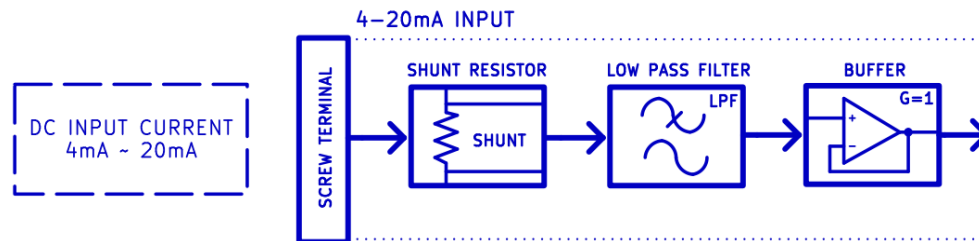


Figura 3.2.9: Diagrama de bloques de las entradas analógicas 4~20mA DC del PLC.

El bloque de entradas analógicas 4~20mA se compone de 3 bloques principales, el resistor de derivación, filtro pasa bajas y buffer de salida.

- **Resistor de Derivación:**

El método de detección más comúnmente utilizado para registrar el flujo de corriente implica el empleo de una resistencia de precisión de bajo valor situada en el trayecto de la corriente, como el que se muestra en la figura 3.2.10, la cual es la forma más sencilla de medir el flujo de corriente es con una resistencia en derivación de corriente, a través de la cual se desarrolla un voltaje proporcional a la corriente que fluye a través de ella.

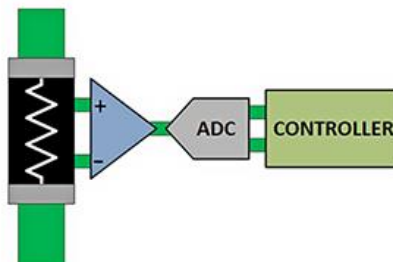


Figura 3.2.10: Forma de medir el flujo de corriente es con una resistencia en derivación.

Esta resistencia, comúnmente conocida como de derivación, genera una tensión a través de sí misma que es directamente proporcional a la intensidad de la corriente que la atraviesa.

Dado que la resistencia de derivación no debe influir de manera significativa en el flujo de corriente, suele tener dimensiones bastante reducidas. Por consiguiente, la tensión generada a través de la resistencia de derivación también es relativamente baja y, en muchas ocasiones, requiere ser amplificada antes de ser convertida por un convertidor analógico-digital (ADC) (Leibson, 2018).

- **Filtro Pasa-Bajas:**

El filtro pasa-bajas se utiliza para eliminar el ruido de alta frecuencia que puede estar presente en la señal de corriente medida. Esto garantiza una medición precisa y estable al filtrar las componentes de frecuencia no deseadas y mantener solo la señal de corriente de interés dentro del rango de 4-20mA. Un filtro de paso bajo (LPF) es un circuito que solo pasa señales por debajo de su frecuencia de corte mientras atenúa todas las señales por encima de ella., como se parecía en la figura 3.2.11 (Analog Devices, s.f.).

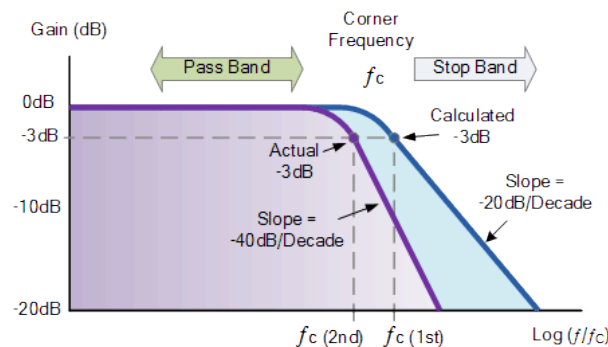


Figura 3.2.11: Gráfico frecuencia de corte para filtro pasa bajas.

Un filtro pasivo simple de paso bajo RC, o LPF, puede ser fácilmente creado conectando en serie un solo resistor con un solo capacitor como se muestra en la figura 3.2.12. En este tipo de configuración de filtro, la señal de entrada (V_{in}) se aplica a la combinación en serie (tanto el resistor como el capacitor juntos), pero la señal de salida (V_{out}) se toma solo a través del capacitor (Electronic Tutorials, s.f.).

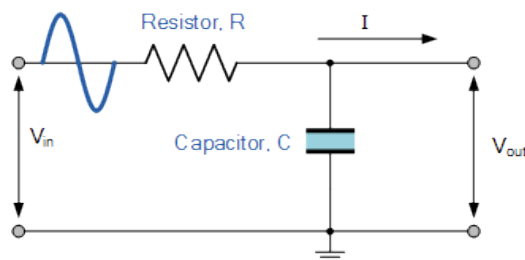


Figura 3.2.12: Circuito de filtro de paso bajo RC de primer orden.

La frecuencia de corte para un filtro paso baja es aquella frecuencia en la cual el voltaje de salida (carga) es igual al 70.7% del voltaje de entrada (fuente). Por encima de la frecuencia de corte, el voltaje de salida es menor al 70.7% del voltaje de entrada, y viceversa (All About Circuits, s.f.).

- **Buffer de Salida:**

El buffer amplificador se utiliza para mejorar la integridad de la señal y proporcionar una salida de corriente adecuada al PLC. Actúa como una interfaz entre el circuito de medición y el sistema de adquisición de datos del PLC, asegurando que la señal de corriente medida se transmita de manera efectiva y confiable al microcontrolador ESP32.

3.2.4 Bloque de Interfaz USB-UART

El bloque de interfaz USB UART se integra para facilitar la comunicación y programación del dispositivo a través de una conexión USB. Este módulo permite al sistema interactuar con dispositivos externos y facilita la transferencia de datos de forma eficiente. La figura 3.2.13 muestra la representación a bloques general de la interfaz USB UART.

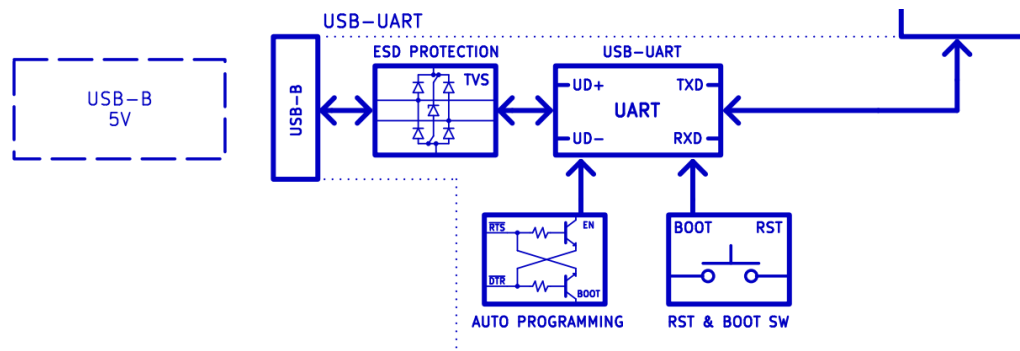


Figura 3.2.13: Diagrama de bloques de interfaz USB-UART del PLC.

El bloque de conversión USB-UART se compone de protección ESD, Conversor USB-UART, Auto-programación, Interfaz de Reset y Flash.

- **Protección ESD:**

En esta etapa, es importante considerar un suceso eléctrico importante conocido como descarga electrostática (ESD). Cuando se conectan o desconectan dispositivos USB, existe la

posibilidad de que se transfiera energía electrostática entre el host y los periféricos. La ESD plantea un riesgo de dañar los sensibles circuitos internos tanto del host como del transceptor periférico, como se puede apreciar en la figura 3.1.14 (Oji, 2024)

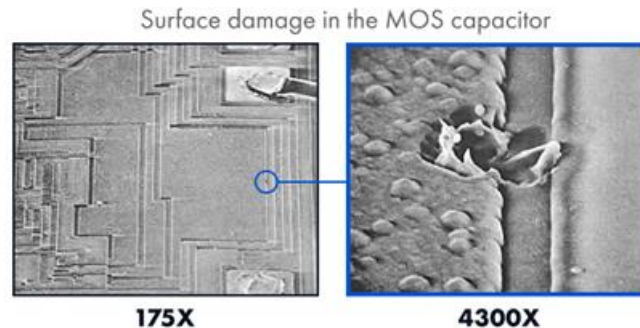


Figura 3.2.14: Superficie dañada por ESD en capacitor MOS vista con microscopio de electrones.

La descarga electroestática (como sus siglas en inglés ESD, que significan electrostatic discharge) es un fenómeno electroestático que hace que circule una corriente eléctrica repentina y momentáneamente entre dos objetos de distinto potencial eléctrico, dichos voltajes pueden alcanzar miles de voltios, y se hace necesario indicar mediante etiquetas que dichas tarjetas PCB son susceptibles a daños por ESD, como la mostrada en la figura 3.2.15 (Rodríguez, 2020).



Figura 3.2.15: Etiqueta de precaución de ESD en placa electrónica.

Para mitigar el riesgo de daños por ESD, se implementan medidas de protección contra ESD, que generalmente implican la colocación de un diodo de supresión de voltaje transitorio (TVS) entre el puerto USB y el controlador USB. Idealmente, el diodo TVS debería colocarse lo más cerca posible del puerto USB para neutralizar eficazmente las amenazas transitorias que se originan en la fuente (Bhattacharya, 2020).

Al utilizar el diodo TVS (diodo de protección ESD), puede absorber ESD intrusivas, evitar el mal funcionamiento del circuito y proteger dispositivos como IC como se aprecia en la figura 3.2.16 (Toshiba Semiconductor, s.f.).

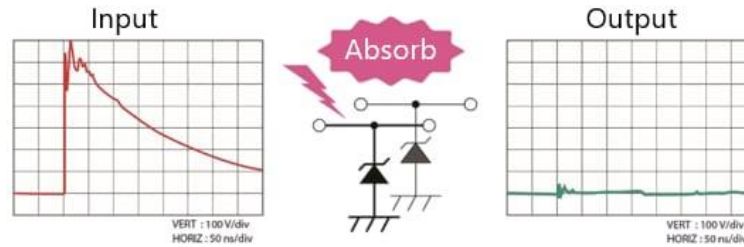


Figura 3.2.16: Grafico de pico de sobrevoltaje ocasionado por descarga ESD.

- **Conversor USB-UART:**

UART, que significa transmisor/receptor universal asíncrono, establece un conjunto de reglas para la transmisión de datos en serie entre dos dispositivos. Es un protocolo sencillo que utiliza solo dos cables entre el transmisor y el receptor para la comunicación bidireccional. Ambos dispositivos comparten una conexión a tierra. La comunicación UART puede ser simplex (unidireccional), semidúplex (comunicación alternada) o dúplex completo (ambos dispositivos pueden transmitir simultáneamente). En este protocolo, los datos se envían en tramas como se muestra en la figura 3.2.17 (Rohde & Schwarz, s.f.).

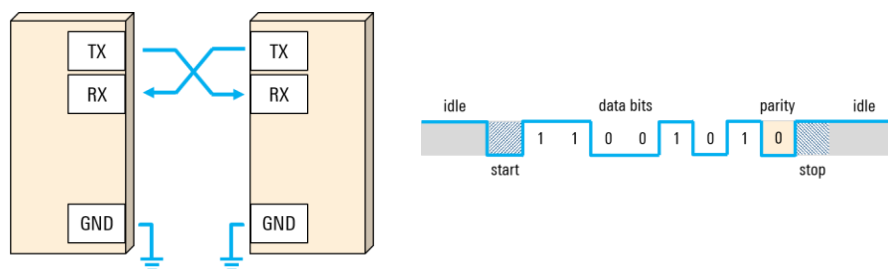


Figura 3.2.17: En comunicación UART la comunicación se realiza por tramas de datos.

En microcontroladores, tanto USB como UART son interfaces de comunicación comunes. Cuando los dispositivos necesitan transferir datos entre ambas, se construye un puente USB-a-UART. Este puente actúa como un traductor entre las dos interfaces para permitir que un dispositivo envíe/reciba información en una interfaz y reciba/envíe la información en la otra interfaz (Texas Instruments, 2021).

- **Auto-Programación:**

La función de auto-programación permite que el propio conversor USB-UART del PLC se encargue automáticamente de poner el dispositivo en modo de programación (modo flash) y reiniciarlo cuando se carga un programa a través del USB. Esta característica elimina la necesidad de que el usuario tenga que presionar físicamente los botones de reset y flash del PLC, simplificando así el proceso de carga de programas del PLC.

- **Interfaz de Reset y Flash:**

La interfaz de reset proporciona un mecanismo físico para reiniciar el PLC en caso de errores o fallos del sistema. Del mismo modo, la interfaz de flash permite la programación del firmware del PLC y la actualización del software de manera manual y segura.

3.2.5 Bloque de Reloj en Tiempo Real

El bloque de Reloj en Tiempo Real (RTC) con respaldo de energía se incorpora para mantener un registro temporal preciso y garantizar la sincronización de eventos en el sistema. Este componente es fundamental para el seguimiento temporal de operaciones y eventos críticos en el dispositivo PLC IIoT. La figura 3.2.18 muestra la representación a bloques general del RTC.

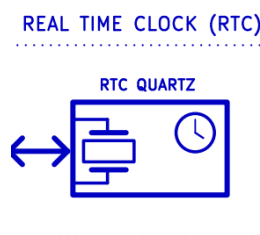


Figura 3.2.18: Diagrama de bloques del Reloj en Tiempo Real (RTC) del PLC.

El RTC es un circuito integrado que proporciona una referencia de tiempo precisa y estable. Este reloj permite al PLC mantener un registro preciso del tiempo, lo que es fundamental para la coordinación de tareas, la programación de eventos y el seguimiento temporal de operaciones críticas en el sistema IIoT. Además, el RTC puede ser utilizado para generar marcas de tiempo en los datos registrados, facilitando el análisis y la auditoría de los eventos.

3.2.6 Bloque de Salidas a Relevador

El bloque de Salidas a Relevador está diseñado con ocho salidas a relé que ofrecen capacidades de conmutación de 30VDC @ 5A y 250VAC @ 5A, lo que las hace adecuadas para el control de cargas industriales. Estas salidas proporcionan una interfaz robusta y confiable para activar y desactivar dispositivos externos en procesos industriales. La figura 3.2.19 muestra la representación a bloques general de las salidas a relevador.

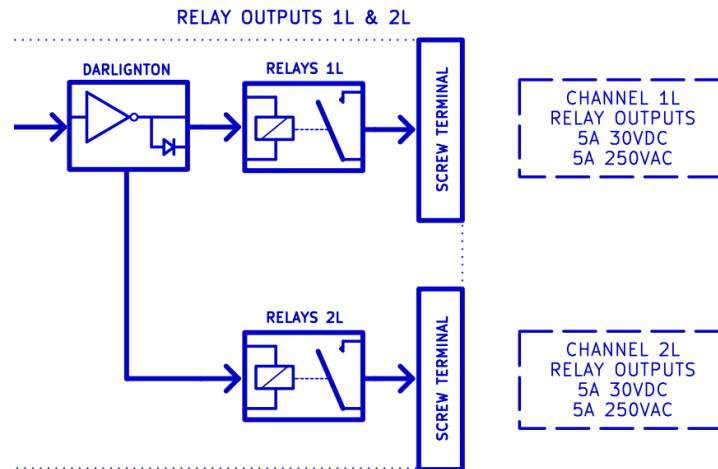


Figura 3.2.19: Diagrama de bloques de las salidas a relevador del PLC.

El bloque de salidas a relevador se compone del controlador Darlington y relevadores 1L y 2L.

- **Controlador Darlington:**

Los pares de transistores Darlington pueden estar compuestos por dos transistores bipolares conectados individualmente o por un solo dispositivo fabricado comercialmente en un único paquete con las conexiones estándar de emisor, base y colector (Electronic Tutorials, s.f.)

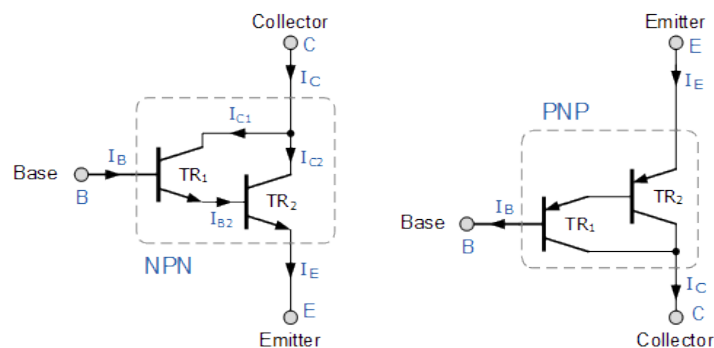


Figura 3.2.20: Configuración básica del transistor Darlington.

La base del transistor Darlington es lo suficientemente sensible como para responder a cualquier corriente de entrada pequeña procedente de un interruptor o directamente desde una compuerta lógica TTL o CMOS de 5V. La corriente máxima del colector $I_c(\max)$ para cualquier par Darlington es la misma que la del transistor de conmutación principal, TR2, visto en la figura 3.2.20, por lo que se puede utilizar para operar relés, motores de corriente continua, solenoides y lámparas, entre otros dispositivos como los mostrados en la figura 3.2.21 (Electronic Tutorials, s.f.).

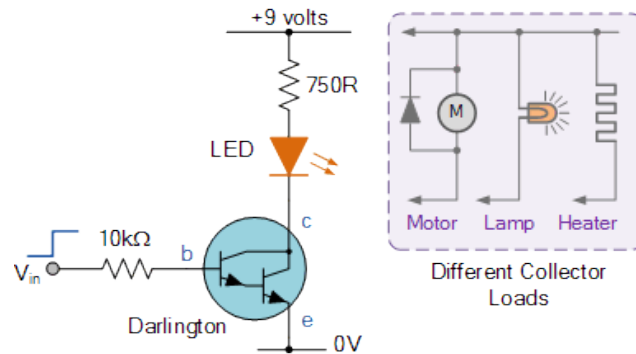


Figura 3.2.21: Aplicaciones de uso para transistores Darlington.

El ULN2003A es un conjunto de transistores Darlington unipolar económico con alta eficiencia y bajo consumo de energía, lo que lo hace útil para controlar una amplia gama de cargas, incluidos solenoides, relés, motores DC y pantallas LED o lámparas de filamento. El ULN2003A contiene siete pares de transistores Darlington, cada uno con un pin de entrada a la izquierda y un pin de salida opuesto a él a la derecha, como se muestra en la figura 3.2.22.

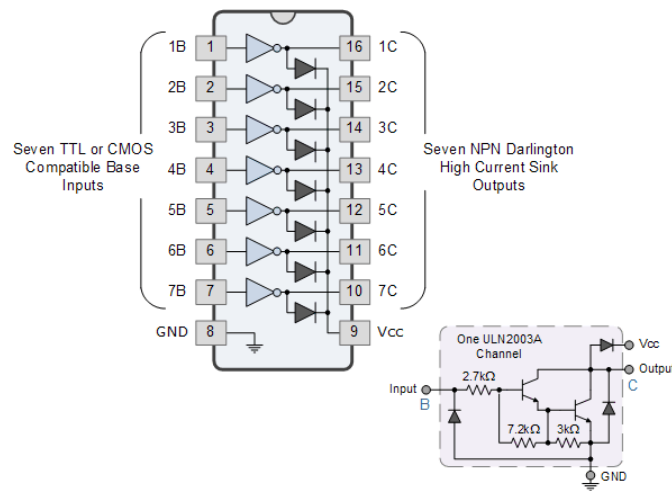


Figura 3.2.22: Transistores Darlington empaquetado en un circuito integrado.

- **Relevadores 1L y 2L:**

Los relevadores 1L y 2L son dos bloques de relevadores, cada uno con cuatro relevadores. Estos relevadores proporcionan la capacidad de conmutación necesaria para activar y desactivar cargas industriales conectadas al PLC. Cada bloque de relevadores cuenta con un terminal común (común) que está separado del otro bloque, lo que permite una conexión independiente de las cargas controladas por cada bloque de relevadores.

3.2.7 Bloque de Salidas a Transistor 24V DC

El bloque de Salidas a Transistor 24V DC incorpora salidas de transistor diseñadas para aplicaciones de control de baja potencia. Este bloque proporciona cuatro salidas de 24VDC, ideales para controlar dispositivos que requieren una corriente y voltaje más bajos en entornos industriales, por ejemplo, semáforos industriales. La figura 3.2.23 muestra la representación a bloques general de las salidas a transistor.

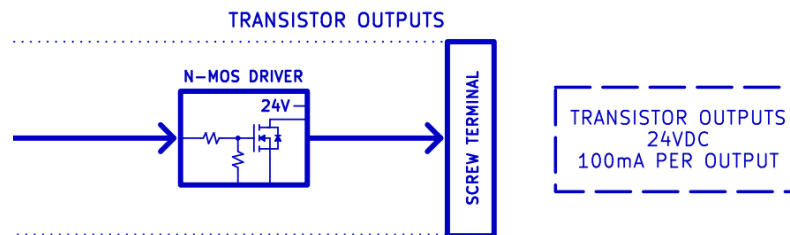


Figura 3.2.23: Diagrama de bloques de las salidas a transistor del PLC.

- **Controlador N-MOS:**

Un MOSFET N-MOS se puede utilizar como un interruptor electrónico en circuitos de control. La tensión de entrada de la puerta, V_{GS} , se ajusta a un nivel de voltaje positivo apropiado para activar el dispositivo, encendiendo así la carga conectada, o a un nivel de voltaje cero que desactiva el dispositivo, apagando la carga. Cuando la tensión aplicada a la puerta supera un umbral específico, el MOSFET se activa, permitiendo que la corriente fluya a través del dispositivo y encienda la carga. Por otro lado, al eliminar la tensión de la puerta, el MOSFET se desactiva, cortando la corriente y apagando la carga (Electronic Tutorials, s.f.).

El siguiente diagrama de la figura 3.2.24 muestra un circuito muy simple para encender o apagar una carga, como una lámpara o LED.

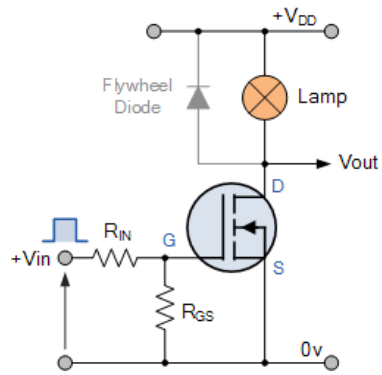


Figura 3.2.24: MOSFET de canal N en modo de mejora para encender y apagar una lámpara simple.

3.2.8 Bloque de Fuente de Alimentación

El bloque de Fuente de Alimentación DC es fundamental en el sistema, ya que proporciona la energía necesaria para todos los componentes, asegurando un suministro estable y confiable. Esta fuente de alimentación convierte la corriente directa (DC) proveniente de una fuente externa de 24V DC para alimentar adecuadamente el PLC, además este bloque contempla una salida aislada de voltaje simétrico de $\pm 12V$ DC para alimentar sensores externos. La figura 3.2.25 muestra la representación a bloques general de la fuente de alimentación.

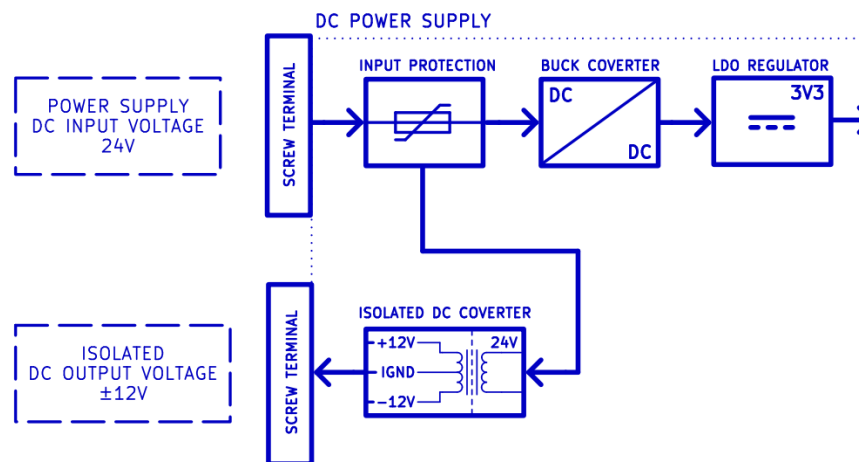


Figura 3.2.25: Diagrama de bloques de la fuente de alimentación del PLC.

El bloque de fuente de alimentación se compone de protección de entrada, convertidor Buck, regulador de voltaje LDO y Convertidor DC aislado.

- **Protección de Entrada:**

Para la protección del bloque de fuente de alimentación se plantea el uso de fusibles reiniciables PPTC. Los fusibles reiniciables PPTC son un componente comúnmente utilizado en la protección de circuitos, se emplea frecuentemente como sustituto de los fusibles convencionales debido a su capacidad para proteger contra sobrecorriente. Además de su función principal, también cumplen otras funciones en la protección de circuitos, como la limitación de sobretensiones, la desconexión automática en caso de cortocircuitos o sobrecargas, y la protección contra pulsos anchos (YAGEO Group).

Algunos de los parámetros críticos a considerar al diseñar dispositivos PPTC en un circuito incluyen la corriente de retención y de disparo del dispositivo, el efecto de las condiciones ambientales en el rendimiento del dispositivo, la corriente de fuga en estado de disparo y las condiciones de reinicio automáticas o manuales (Littelfuse, 2016).

- **Conversor Reductor DC-DC:**

Las fuentes de alimentación conmutadas proporcionan una eficiencia superior en comparación con las fuentes de alimentación lineales convencionales. Tienen la capacidad de aumentar, disminuir e invertir el voltaje. Los componentes básicos del circuito de conmutación pueden ser reorganizados para crear un convertidor reductor (buck), un convertidor elevador (boost) o un inversor (flyback). Estos diseños se muestran en las figuras 3.2.26 a, b, c y d respectivamente, donde las Figuras c y d son iguales excepto por la polaridad del transformador y el diodo.

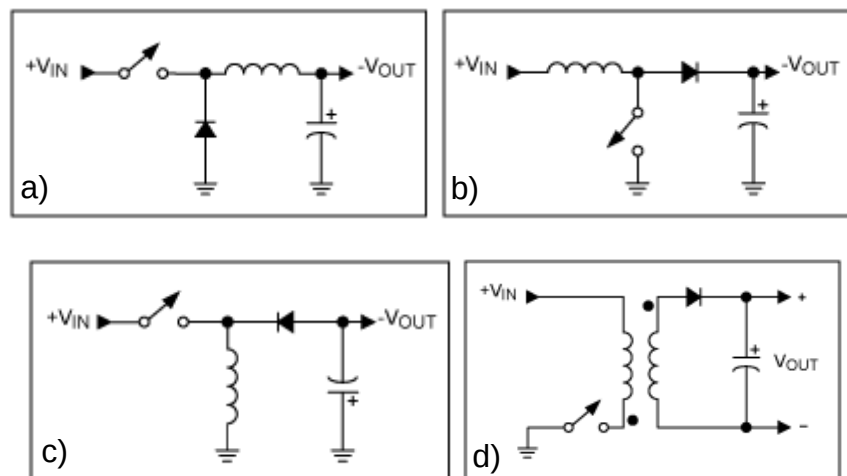


Figura 3.2.26: Topologías (a) Buck, (b) Simple boost, (c) Inverting, (d) Transformador flyback.

Los reguladores lineales como el clásico LM7805 o el LM317 son fáciles de utilizar, pero carecen de eficiencia energética. En contraste, los reguladores conmutados ofrecen niveles superiores de eficiencia energética, alcanzando más del 80%. Estos convertidores conmutan el voltaje almacenando energía de entrada periódicamente y luego liberándola en la salida para alcanzar el nivel de voltaje deseado. Los convertidores DC-DC conmutados, diseñados para maximizar la eficiencia energética, están compuestos únicamente por componentes que no generan pérdidas, es decir, no absorben energía (Naylamp Mechatronics SAC , s.f.).

- **Regulador LDO:**

Los reguladores de voltaje de baja caída (LDO) se utilizan para proporcionar un voltaje de fuente de alimentación estable independiente de la impedancia de carga, las variaciones de voltaje de entrada, la temperatura y el tiempo. Los reguladores de baja caída se distinguen por su capacidad para mantener la regulación con pequeñas diferencias entre la tensión de alimentación y la tensión de carga (Patoux, s.f.).

La ventaja clave de un LDO es su simplicidad y diseño de bajo costo con bajo nivel de ruido y rápida conversión de voltaje, la figura 3.2.27 muestra la conexión básica de un LDO (Richtek Technology, 2014).

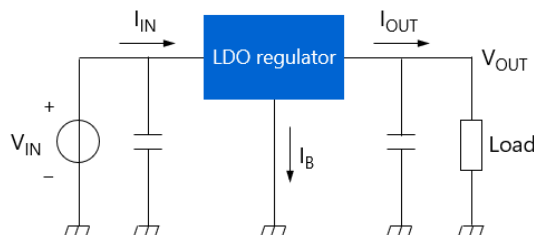


Figura 3.2.27: Diagrama electrónico de conexión básica de regulador LDO.

- **Conversor DC-DC Aislado:**

Los convertidores DC-DC aislados cuentan con una separación física, generalmente a través de un transformador, entre la entrada y la salida. Esta separación asegura que no haya una conexión eléctrica directa, lo que proporciona protección contra descargas eléctricas, interferencias. Son comúnmente empleados en aplicaciones industriales debido a su capacidad para garantizar la seguridad y reducir el ruido eléctrico (Bestaş, s.f.).

3.2.10 Diagrama de Bloques Completo

Como parte fundamental del desarrollo es necesario contar con un diagrama de bloques que ilustre la arquitectura y la interconexión de los componentes principales del sistema PLC IIoT. Este diagrama proporciona una visión general de alto nivel que facilita la comprensión de la estructura del sistema y cómo interactúan sus diferentes elementos para lograr un funcionamiento integrado y eficiente. En la figura 3.2.28 muestra el diagrama de bloques completo del dispositivo PLC IIoT.

BLOCK DIAGRAM

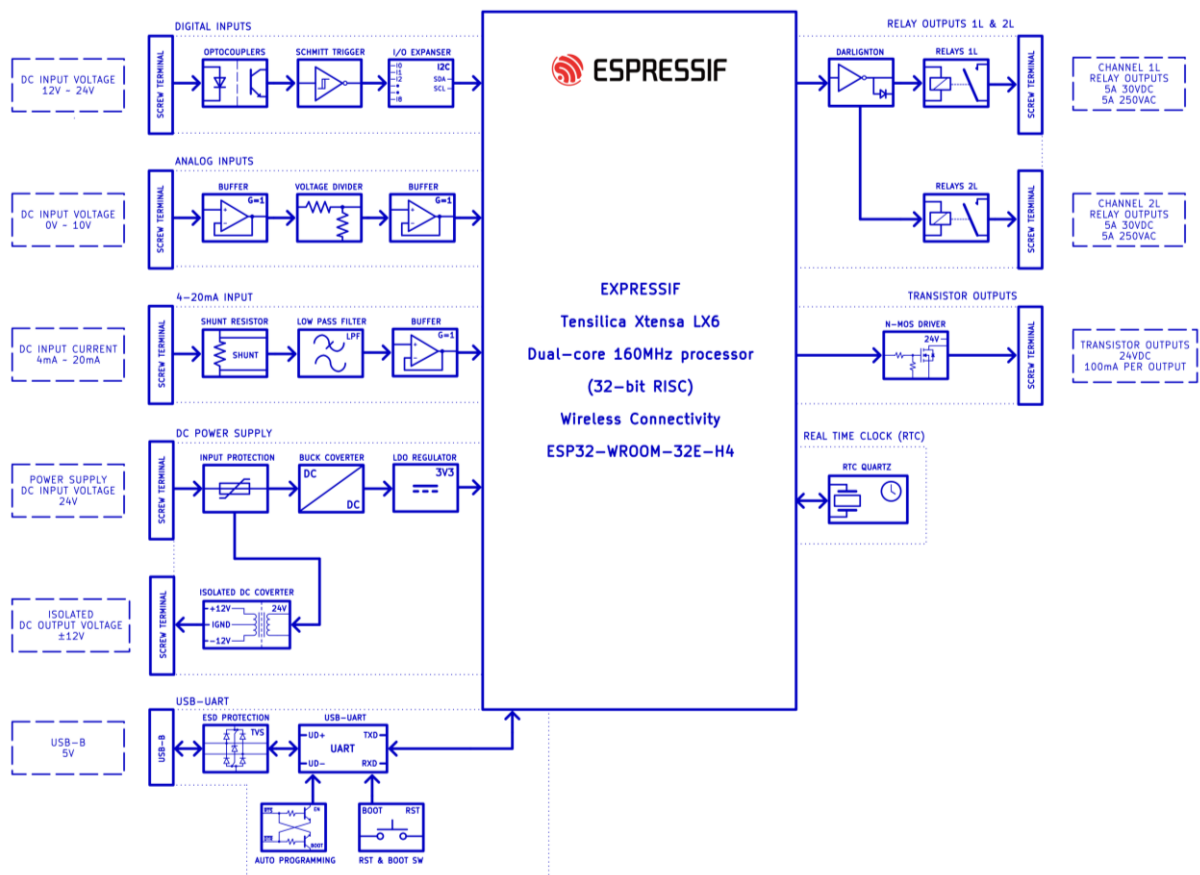


Figura 3.2.28: Diagrama de Bloques Completo del PLC IIoT.

Basado en el diseño de alto donde se desglosa el diagrama de bloques completo del PLC IIoT, se facilita la estructuración general del sistema y la identificación de componentes clave. Esta visión ofrece una guía esencial para comprender la interacción entre los bloques del sistema, desde una perspectiva general hasta los detalles más específicos. Así, el diseño de alto nivel actúa como un punto de partida crucial para asegurar la coherencia y la integridad del proyecto en su conjunto. A lo largo del ciclo de vida de desarrollo.

3.3 Diseño de Componentes

En esta sección, se aborda el diseño detallado de los componentes individuales del sistema. Esto implica la creación de diagramas esquemáticos preliminares, la selección de componentes, el cálculo de valores para los componentes y la emulación de estos mediante pruebas físicas a nivel de prototipo. Cada bloque del sistema se diseña individualmente, representando una sección del conjunto. Por ejemplo, si un bloque tiene 8 salidas, solo se mostrará el diseño de una salida, ya que las demás serán todas iguales.

3.3.1 Diseño de Entradas Digitales

El diseño de las entradas digitales del PLC se ha fundamentado en un análisis minucioso de los requisitos del diseño de alto nivel, abordando aspectos como la tensión de operación, la corriente máxima y la protección contra sobretensiones. Este análisis ha sido esencial para orientar el diseño, asegurando que las entradas digitales cumplan con los estándares de rendimiento y seguridad necesarios para su correcto funcionamiento.

- **Diagrama Esquemático:**

Se ha elaborado un diagrama esquemático preliminar, el cual se muestra en la figura 3.3.1. En esta etapa, el diagrama incluye únicamente los identificadores de cada componente (por ejemplo, D1, R1, etc.), lo que permite una visualización clara de la disposición general de los elementos del bloque de entradas digitales de 24V DC.

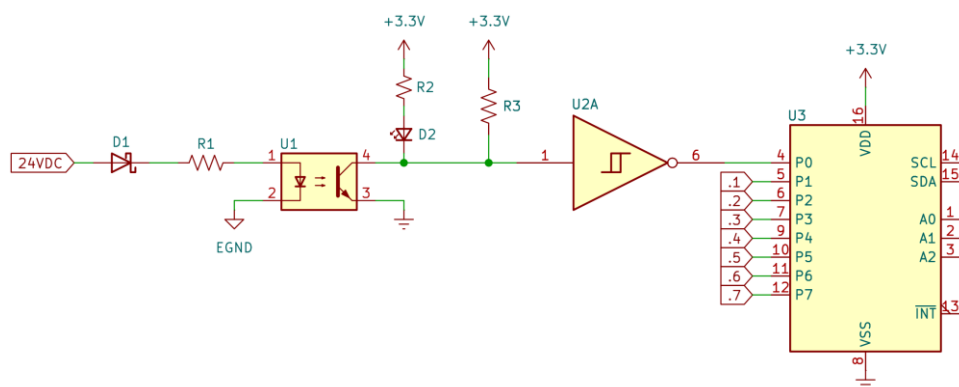


Figura 3.3.1: Diagrama esquemático preliminar del bloque de entradas digitales de 24VDC.

Este diagrama ha sido diseñado teniendo en cuenta tanto los requisitos técnicos como los funcionales derivados del análisis detallado de las especificaciones del sistema y del diseño de alto nivel previamente establecido. Su objetivo principal es proporcionar una representación

inicial de la configuración general del bloque, sirviendo como punto de partida para la selección de componentes. El circuito electrónico incluye los siguientes componentes electrónicos:

- **D1 (Diodo de Protección):** El diodo Schottky se coloca en serie con la entrada digital para proteger el circuito contra la polaridad inversa aplicada a la entrada.
- **U1 (Optoacoplador):** El optoacoplador proporciona aislamiento eléctrico entre la parte de entrada y la parte de salida del circuito.
- **R1 (Resistor Limitador de Corriente):** El resistor se conecta en serie con la entrada y limita la corriente que fluye a través del diodo infrarrojo (IR) del optoacoplador.
- **D2 (LED Indicador):** El LED indica el estado de alto o bajo presente en la entrada digital. Proporciona una indicación visual clara del estado de la señal de entrada.
- **R2 (Resistor Limitador de Corriente del LED):** El resistor limita la corriente del LED indicador D2 para garantizar un funcionamiento seguro y prolongar la vida útil del componente.
- **R3 (Resistor Pull-Up):** El resistor actúa como resistor de pull-up para garantizar la presencia de un estado lógico en la entrada de la compuerta Schmitt Trigger.
- **U2A (Compuerta NOT Schmitt Trigger):** La compuerta NOT Schmitt Trigger proporciona un filtrado para alta velocidad de conmutación y una respuesta robusta a las señales de entrada.
- **U3 (Expansor E/S):** Expansor de entradas y salidas digitales I2C para expandir capacidades de entradas y salidas del microcontrolador ESP32.

- ***Selección de Componentes:***

Para garantizar el funcionamiento óptimo del circuito electrónico, se realizó una cuidadosa selección de componentes, teniendo en cuenta los requisitos técnicos y funcionales del diseño. A continuación, se detallan los valores seleccionados para los componentes principales y los circuitos integrados utilizados en el circuito:

- **D1 (Diodo de Protección):**

Se seleccionó un diodo Schottky con número de parte B5819W para proteger el circuito contra la polaridad inversa aplicada a la entrada digital de 24 VDC. Este diodo tiene las siguientes características técnicas (MDD, 2021):

- Corriente directa: 1.5 A
- Caída de tensión directa: 0.55 V @ 1 A
- Voltaje inverso máximo: 40 V
- Temperatura de operación: -55 °C a 125 °C

Estas especificaciones hacen que el diodo B5819W sea ideal para su aplicación en el circuito, proporcionando protección contra la polaridad inversa dada su corriente y voltaje de operación. El encapsulado que tiene el B5819W es SOD-123, ver figura 3.3.2.



Figura 3.3.2: Encapsulado SOD-123.

- U1 (Optoacoplador):

Se seleccionó el optoacoplador de montaje superficial modelo SOP-4 EL357C de la empresa UMW para proporcionar aislamiento eléctrico entre la parte de entrada y la parte de salida del circuito. Este optoacoplador cuenta con las siguientes características técnicas (UMW, 2023):

- Tensión de aislamiento: 3750 Vrms
- Corriente directa máxima del LED: 60 mA
- Corriente de colector máxima: 50 mA
- Tiempo de respuesta: 3.5 μ s
- Temperatura de funcionamiento: -55 °C a 110 °C

La figura 3.3.3 muestra la apariencia física del optoacoplador EL357 con encapsulado SOP-4



Figura 3.3.3: Encapsulado SOP-4.

- R1 (Resistor Limitador de Corriente):

Para limitar la corriente que fluye a través del diodo infrarrojo del optoacoplador U1, se seleccionó un resistor SMD de montaje superficial. El valor del resistor (R_{in}) se calculó tomando en cuenta las especificaciones técnicas dadas en las hojas de datos de los componentes, del diodo de protección y del optoacoplador.

-Voltaje de entrada digital V_{in} : 24 V

-Voltaje de caída en directa del diodo de protección V_{FD} : 0.55 V

-Voltaje de caída en directa del LED del optoacoplador V_{FO} : 1.24 V

-Corriente en directa del LED del optoacoplador I_{FO} : 10 mA

$$R_{in} = \frac{V_{in} - V_{FD} - V_{FO}}{I_{FO}} = \frac{24 V - 0.55 V - 1.24 V}{10 mA} = 2221 \Omega \approx 2.2 k\Omega$$

El valor del resistor obtenido es de 2 221 Ω , el valor comercial mas cercano es de 2.2 k Ω .

La potencia por disipar por el resistor ($P_{R_{in}}$) se calcula como:

$$P_{R_{in}} = R_{in} \cdot I_{FO}^2 = 2.2 k\Omega \cdot (10 mA)^2 = 220 mW$$

La potencia por disipar por el resistor de entrada es de 220 mW. En resistores de montaje SMD el tamaño del empaquetado define la potencia que puede disipar, en la figura 3.3.4 muestra los empaquetados disponibles y la potencia que puede disipar.

Code		Length (l)		Width (w)		Height (h)		Power
Imperial	Metric	inch	mm	inch	mm	inch	mm	Watt
0201	0603	0.024	0.6	0.012	0.3	0.01	0.25	1/20 (0.05)
0402	1005	0.04	1.0	0.02	0.5	0.014	0.35	1/16 (0.062)
0603	1608	0.06	1.55	0.03	0.85	0.018	0.45	1/10 (0.10)
0805	2012	0.08	2.0	0.05	1.2	0.018	0.45	1/8 (0.125)
1206	3216	0.12	3.2	0.06	1.6	0.022	0.55	1/4 (0.25)
1210	3225	0.12	3.2	0.10	2.5	0.022	0.55	1/2 (0.50)
1812	3246	0.12	3.2	0.18	4.6	0.022	0.55	1
2010	5025	0.20	5.0	0.10	2.5	0.024	0.6	3/4 (0.75)
2512	6332	0.25	6.3	0.12	3.2	0.024	0.6	1



Figura 3.3.4: Tamaños, empaquetados y potencia de resistores SMD.

Debido a que el resistor de entrada (R_{in}) disipa una potencia de 220 mW, el empaquetado seleccionado es 1206, que tiene una potencia de 250 mW. Se eligió el número de parte CRCW12062K20FKEA con una resistencia de 2.2 k Ω y una tolerancia del 1% para garantizar un funcionamiento óptimo del circuito.

- D2 (LED Indicador):

Se seleccionó un LED verde de montaje superficial (SMD) para indicar el estado de alto o bajo presente en la entrada. El número de parte seleccionado es YLED0603YG de la marca YONGYUTAI, con empaquetado 0603, como el mostrado en la figura 3.3.5.

Las características técnicas importantes de este LED son (YONGYUTAI, 2023):

- Tensión directa típica: 2.4 V
- Corriente directa máxima: 20 mA
- Ángulo de visión: 120 grados



Figura 3.3.5: Empaquetado 0603 LED.

- R2 (Resistor Limitador de Corriente del LED):

El resistor R2 se seleccionó para limitar la corriente que fluye a través del LED indicador D2. El valor del resistor se calculó tomando en cuenta el voltaje del LED (V_F) y el voltaje de suministro (V_{CC}). Debido a que es un indicador luminoso no se requiere una corriente alta, por lo que una corriente de 1.7 mA será suficiente.

- Voltaje de caída LED en directa (V_F): 2.4 V
- Corriente en directa LED (I_F): 1.7 mA
- Voltaje de suministro (V_{CC}): 3.3 V

$$R_{LED} = \frac{V_{CC} - V_F}{I_F} = \frac{3.3 \text{ V} - 2.4 \text{ V}}{1.7 \text{ mA}} = 529 \Omega \approx 510 \Omega$$

El valor del resistor obtenido es 529 Ω , sin embargo, el valor comercial más cercano es 510 Ω .

La potencia para el resistor es:

$$P_{R_{LED}} = R_{LED} \cdot I_F = 510 \Omega \cdot 1.7 \text{ mA} = 1.47 \text{ mW}$$

El resistor solo disipará una potencia de 1.47 mW , con lo que un empaquetado 0603, funciona sin problema, que de acuerdo con la figura 3.3.4 el empaquetado 0603 puede soportar una potencia de 100 mW . La figura 3.3.6 muestra el tamaño de los empaquetados de resistor SMD.



Figura 3.3.6: Empaquetados de resistor SMD.

Se eligió el número de parte CRCW0603510RFKEA con una resistencia de $510\ \Omega$ y una tolerancia del 1% para garantizar un funcionamiento óptimo del circuito.

- R3 (Resistor Pull-Up):

Se seleccionó un resistor de 10k ohmios para actuar como resistor pull-up. Este valor se eligió debido a su amplia aceptación y uso generalizado en aplicaciones electrónicas.

Debido a que se trata de resistores que tienen la única función de mantener un estado lógico, se optó por emplear el resistor de red con numero de parte YC164-FR-0710KL con valor de $10\text{ k}\Omega$ y tolerancia del 1% con encapsulado 0603x4 como el mostrado en la figura 3.3.7.



Figura 3.3.7: Empaquetado 0603x4.

- U2A (Compuerta NOT Schmitt Trigger):

Se utilizará la compuerta NOT Schmitt Trigger, para la cual se ha elegido el circuito integrado 74HC14D. Las características técnicas importantes de este circuito integrado son (HTC, 2020):

- Tensión de alimentación: 2 V min 6 V max.

- Tiempo de retardo de propagación: 11 ns
- Temperatura de operación: -40 °C a 85 °C

El circuito integrado 74HC14D es una opción adecuada para proporcionar una compuerta NOT Schmitt Trigger en el circuito, la figura 3.3.8 muestra el empaquetado SOP-14 a utilizar.



Figura 3.3.8: Empaquetado SOP-14.

- U3 (Expansor E/S):

Se ha seleccionado el PCF8574A para actuar como un expansor de entradas/salidas (E/S) en el circuito. Este dispositivo permite aumentar el número de puertos de E/S disponibles en el microcontrolador principal, proporcionando una interfaz sencilla y eficiente para la conexión de dispositivos externos. El PCF8574A ofrece las siguientes características (HGSEMI, 2018):

- Número de puertos de E/S: 8
- Voltaje de alimentación: 2.5 a 6 V
- Tensión de entrada máxima: 0 a Vcc
- Tensión de salida mínima: 0 a Vcc
- Comunicación: I2C

El empaquetado a utilizar es SOP-16 como el mostrado en la figura 3.3.9.



Figura 3.3.9: Empaquetado SOP-16.

3.3.2 Diseño de Entradas Analógicas 0V~10V DC

El diseño de las entradas analógicas de 0V~10V DC para el PLC se ha basado en un análisis detallado de los requisitos específicos, abordando aspectos como la tensión de operación, la corriente máxima y la protección contra sobretensiones.

- **Diagrama Esquemático:**

Se ha elaborado un diagrama esquemático preliminar, el cual se muestra en la figura 3.3.10. En esta etapa, el diagrama incluye únicamente los identificadores de cada componente (por ejemplo, D1, R1, etc.), lo que permite una visualización clara de la disposición general de los elementos del bloque de entradas analógicas.

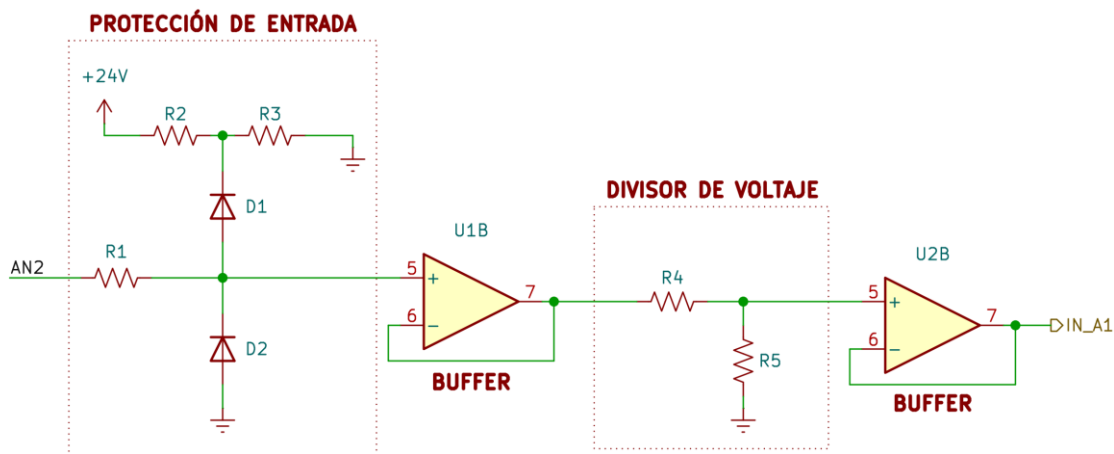


Figura 3.3.10: Diagrama esquemático preliminar del bloque de entradas analógicas 0V~10V.

El circuito electrónico incluye los siguientes componentes electrónicos:

- **R1, R2, R3, D1, D2 (Protección de Entrada):** Estos componentes conforman la protección de entrada contra voltaje inverso y sobrevoltaje, asegurando la integridad del circuito en caso de condiciones anormales de operación.
- **U1B (Buffer 1):** Se emplea un amplificador operacional configurado en modo seguidor de voltaje (Buffer) para evitar afectar el voltaje de entrada de 0V~10V.
- **R4, R5 (Divisor de Voltaje):** Estos resistores se utilizan en un divisor de voltaje para reducir la señal de entrada de 0V~10V a un rango compatible con el sistema, en este caso, de 0V~3.3V. Este paso es fundamental para adaptar la señal analógica al rango de voltaje requerido por el ADC del microcontrolador ESP32.

- **U2B (Buffer 2):** Para evitar variaciones en el voltaje del divisor de voltaje, se emplea un segundo amplificador operacional configurado en modo seguidor de voltaje (Buffer).

- **Selección de Componentes:**

A continuación, se detallan los valores seleccionados para los componentes principales y los circuitos integrados utilizados en el circuito:

- **R1, R2, R3, D1, D2 (Protección de Entrada):**

La parte de protección de entrada fue diseñada con base al libro *The Art of Electronics* que muestra en el capítulo 1 sección C Diode clamps (Horowitz, 2016), siguiendo las recomendaciones de diseño.

Los resistores R2 y R3 de la figura 3.3.9 conforman un divisor de voltaje que establece un voltaje de referencia para el diodo D1. Cuando el voltaje de entrada supera este voltaje de referencia más el voltaje directo del diodo (0.7V), el circuito mantiene el voltaje fijo al valor de referencia, y el excedente de voltaje se disipa a través del resistor R1 de la entrada. El diodo D2 se encarga de proteger el circuito en caso de voltaje inverso a la entrada.

Para el divisor de voltaje entre R2 y R3 se calculó teniendo un valor suficientemente alto para evitar disipar mucha potencia en los resistores y que el tamaño se pueda mantener en 0603.

Dado que el voltaje que se desea es 12 V, el divisor de voltaje se conectará entre 24 V y GND.

Para obtener la mitad de voltaje, se selecciona dos resistores del mismo valor, en este caso 2200 Ω .

$$V_{OUT} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot V_{CC} = \frac{2.2 \text{ k}\Omega}{2.2 \text{ k}\Omega + 2.2 \text{ k}\Omega} (24 \text{ V}) = 12 \text{ V}$$

La corriente que circulará a través del divisor resistivo es:

$$I_{VD} = \frac{V_{CC}}{R_2 + R_3} = \frac{24 \text{ V}}{2.2 \text{ k}\Omega + 2.2 \text{ k}\Omega} = 5.45 \text{ mA}$$

La potencia por disipar por cada resistor es:

$$P_R = R \cdot I_{VD}^2 = 2.2 \text{ k}\Omega \cdot (5.45 \text{ mA})^2 = 65.3 \text{ mW}$$

La potencia por disipar será de 65 mW , por lo que un empaquetado 0603 que puede disipar 100 mW será suficiente para esta aplicación. El número de parte seleccionado es el CRCW06032K20FKEA con valor de $2.2\text{ k}\Omega$ y una tolerancia del 1%.

El autor Horowitz recomienda colocar un resistor más grande a la entrada, por lo que el resistor R1 se seleccionó de $10\text{ k}\Omega$. Dada la corriente que circulará a la entrada es muy baja (prácticamente cero dada la alta impedancia) se seleccionó el empaquetado 0603, el número de parte seleccionado es CRCW060310K0FKEA con un valor de $10\text{ k}\Omega$ y una tolerancia del 1%.

Para los diodos D1 y D2, se seleccionaron 1N4148WS. Estos diodos son de pequeña señal de silicio y se caracterizan por su rápida conmutación y baja capacitancia. Tienen una corriente directa máxima de aproximadamente 200 mA y una tensión directa típica de 0.7 V a 10 mA (JCST, 2011). Además, presentan una alta resistencia en inversa, lo que los hace ideales para aplicaciones de protección. El empaquetado que tiene el diodo es SOD-323 como el mostrado en la figura 3.3.11.



Figura 3.3.11: Empaquetado SOD-323.

- U1B (Buffer 1):

Para el buffer de entrada, designado como U1B, se requiere un amplificador operacional capaz de mantener una alta impedancia de entrada para las señales de 0V a 10V . Dado que el PLC solo trabaja internamente con alimentaciones de 24V , 5V y 3.3V , y se necesita un voltaje de suministro mayor a 12V para el funcionamiento óptimo del amplificador operacional, se optó por seleccionar un amplificador que pueda operar con un voltaje de al menos 24V .

Se eligió el amplificador operacional clásico LM358, que cumple con los requisitos de voltaje de suministro y ofrece un rendimiento adecuado para la aplicación. Las características técnicas que ofrece el amplificador operacional son las listadas a continuación (KEXIN, 2019):

- Voltaje de alimentación: $\pm 3\text{ V}$ a $\pm 32\text{ V}$

- Corriente de entrada de compensación: 20 nA (máx.)

-Corriente de polarización de entrada: 250 nA (máx.)

-Impedancia de entrada: 2 M Ω (mín.)

-Impedancia de salida: 20 Ω (máx.)

-Rango de temperatura de operación: -40°C a +125°C

El LM358 seleccionado puede operar hasta los 32 V, lo que lo hace ideal para su aplicación como buffer con alimentación de 24 V. El empaquetado a utilizar es SOP-8 de montaje superficial como el mostrado en la figura 3.3.12.



Figura 3.3.12: Empaquetado SOP-8.

- R4, R5 (Divisor de Voltaje):

El divisor de voltaje compuesto por los resistores R4 y R5 se utiliza para reducir el rango de voltaje de 0V~10V a 0V~3.3V. El valor de los resistores se realizó tomando en cuenta diseños ya probados por otros ingenieros (RussellH, 2022). Se recomienda el uso de resistores de 6.8 k Ω y 3.3 k Ω , por lo que al resistor R4 será de 6.8 k Ω y R5 de 3.3 k Ω a continuación, se muestra los rangos de voltaje obtenidos cuando se aplica 0 V o 10 V.

Cuando se aplica 0 V:

$$V_{DV} = \frac{R_5}{R_4 + R_5} \cdot V_{CC} = \frac{3.3 \text{ k}\Omega}{6.8 \text{ k}\Omega + 3.3 \text{ k}\Omega} \cdot 0 \text{ V} = 0 \text{ V}$$

Cuando se aplica 10 V:

$$V_{DV} = \frac{R_5}{R_4 + R_5} \cdot V_{CC} = \frac{3.3 \text{ k}\Omega}{6.8 \text{ k}\Omega + 3.3 \text{ k}\Omega} \cdot 10 \text{ V} = 3.267 \text{ V}$$

Cuando se aplica los 10 V a la salida del divisor de voltaje será de 3.267 V, unos cuantos milivoltios por debajo de 3.3 V, lo que se deberá ajustar por firmware, de igual manera ayuda a que el voltaje se mantenga dentro del máximo admitido por el ADC del ESP32.

Los resistores seleccionados son el número de parte CRCW06033K30FKEA con valor de $3.3\text{ k}\Omega$ con tolerancia del 1%, y el resistor con numero de parte CRCW06036K80FKEA con valor de $6.8\text{ k}\Omega$ con tolerancia del 1%.

- U2B (Buffer 2):

Para mantener la estabilidad y la integridad de la señal después de la conversión de voltaje, se seleccionó el amplificador operacional MCP6002 de Microchip Technology. Con una amplia banda de ancho de banda de 1 MHz y una baja corriente de polarización de 1 pA, el MCP6002 ofrece un rendimiento óptimo en aplicaciones de bajo consumo y alta precisión. Su diseño de bajo ruido y su alta velocidad de respuesta lo hacen ideal para sistemas que requieren una alta fidelidad en la amplificación de señales analógica (Microchip Tech, 2020).

Se seleccionó este amplificador debido a que tiene entrada y salida riel a riel. Esto significa que tanto la entrada como la salida del amplificador pueden alcanzar el voltaje de alimentación que para este amplificador será de 3.3V (Toshiba Semiconductor, s.f.).

Para esta aplicación se utiliza el empaquetado SOP-8 como el de la figura 3.3.12.

3.3.3 Diseño de Entradas Analógicas 4~20mA DC

El diseño de las entradas analógicas de 4~20mA DC para el PLC se ha basado en un análisis detallado de los requisitos específicos, abordando aspectos como la corriente máxima y la protección contra interferencias de alta frecuencia.

- **Diagrama Esquemático:**

Se ha elaborado un diagrama esquemático preliminar, el cual se muestra en la figura 3.3.13.

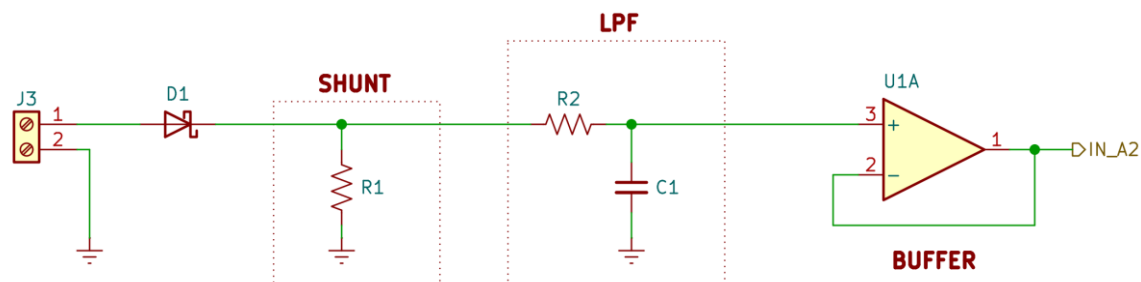


Figura 3.3.13: Diagrama esquemático preliminar del bloque de entradas analógicas 4~20 mA.

El circuito electrónico incluye los siguientes componentes electrónicos:

- **D1 (Protección de Entrada):** Se ha seleccionado un diodo para protección de corriente inversa, garantizando la integridad del circuito ante voltajes inversos aplicados a la entrada analógica.
- **R1 (Resistor de Derivación):** Este resistor de derivación se encarga de establecer la resistencia necesaria en el bucle de corriente para la correcta operación del sensor conectado.
- **R2, C1 (Filtro Pasa-Bajas):** El filtro RC formado por el resistor R2 y el capacitor C1 actúa como un filtro pasa-bajas, atenuando las frecuencias altas y reduciendo así el ruido en la señal de entrada.
- **U1A (Buffer):** Se ha incorporado un buffer, representado por el amplificador operacional U1A, cuya función principal es evitar variaciones en el voltaje leído por el resistor de derivación, proporcionando así una señal de salida estable y precisa.

- **Selección de Componentes:**

A continuación, se detallan los componentes principales y los circuitos integrados seleccionados:

- **D1 (Protección de Entrada):**

Se seleccionó el diodo Schottky B5819WS de montaje superficial (SMD) con empaquetado SOT-323, como el empaquetado mostrado en la figura 3.3.11, Este diodo cumple con los requisitos de corriente y tensión de operación del circuito para proporcionar protección contra corriente inversa en la entrada analógica de 4~20mA.

- **R1 (Resistor de Derivación):**

El valor del resistor de derivación se calculó para cumplir con los requisitos de corriente máxima de entrada del circuito. Se seleccionó un resistor de precisión del 1% de 150 Ω para garantizar una medición precisa de la corriente de entrada.

Los voltajes que serán medidos a través del resistor de 150 Ω , cuando circula una corriente de 4 mA es:

$$V_{SHUNT} = 150 \, \Omega \cdot 4 \, mA = 0.6 \, V$$

Cuando circule una corriente de 20 mA:

$$V_{SHUNT} = 150 \, \Omega \cdot 20 \, mA = 3 \, V$$

Por lo tanto, cuando circule una corriente de 4~20 mA a través del bucle, el voltaje que caerá a través del resistor de derivación es 0.6 V ~ 3 V, lo que deberá ser tomado en cuenta cuando se realice la programación del firmware. El empaquetado seleccionado es 0805, con número de parte CRCW0805150RFKEA con valor de 150 Ω y tolerancia de 1%.

- R2, C1 (Filtro Pasa-Bajas):

Para el filtro pasa-bajas, se estableció una frecuencia de corte de 340 Hz. Al filtrar las frecuencias por encima de 340 Hz, el filtro ayuda a eliminar el ruido de alta frecuencia que puede introducirse en la señal analógica. Esto mejora la calidad de la señal y reduce la posibilidad de errores en la medición.

Por lo tanto, se calcularon el valor del resistor, tomando como valor de referencia inicial de 100 nF, con la ecuación:

$$f_c = 340 \, Hz$$

$$C = 100 \, nF$$

$$R = ?$$

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot f_c} = \frac{1}{2\pi \cdot (100 \, nF) \cdot (340 \, Hz)} = 4 \, 681 \, \Omega$$

Por lo tanto, el resistor de valor comercial más cercano es 4.7 k Ω . Para el resistor se eligió el número de parte CRCW06034K70FKEA con valor de 4.7 k Ω , tolerancia del 1% y empaquetado 0603. Para el capacitor se eligió el número de parte CC0805KRX7R9BB104 con valor de 100 nF y tolerancia del $\pm 10\%$ y empaquetado 0603.

- U1A (Buffer):

Se seleccionó el amplificador operacional MCP6002 de Microchip Technology debido a sus características de entrada y salida riel a riel. Esto lo hace adecuado para mantener la integridad de la señal y evitar distorsiones en el voltaje leído por el resistor de derivación. El amplificador operacional es el mismo a utilizar en el buffer 2 de la entrada analógica 0 V~10 V.

3.3.4 Diseño de Convertidor USB - UART

El diseño del conversor USB-UART para el PLC se ha basado en un análisis detallado de los requisitos específicos. Este análisis ha sido fundamental para la elaboración del diagrama esquemático preliminar del sistema, asegurando que la comunicación cumpla con los estándares de rendimiento y fiabilidad requeridos para su correcto funcionamiento.

- **Diagrama Esquemático:**

Se ha elaborado un diagrama esquemático preliminar, el cual se muestra en la figura 3.3.14.

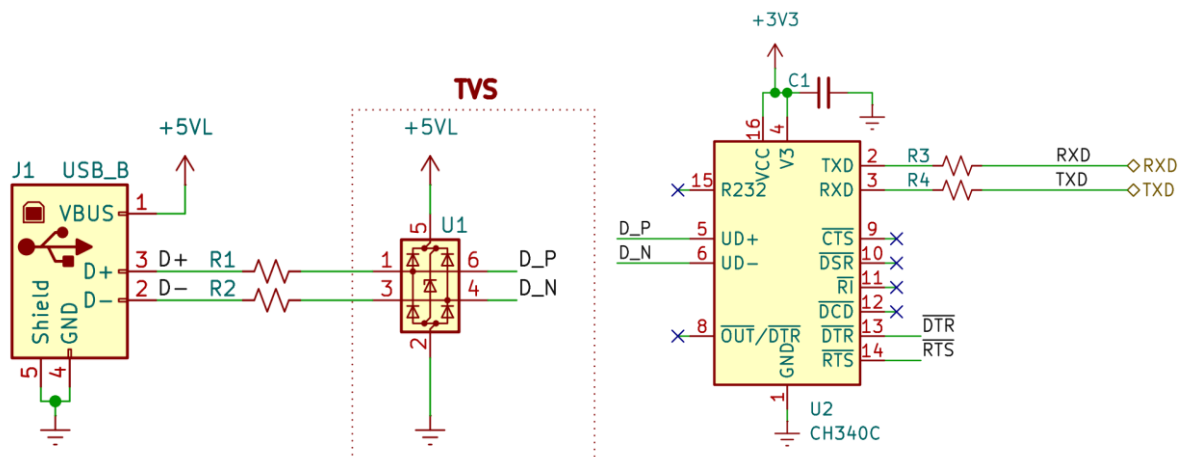


Figura 3.3.14: Diagrama esquemático preliminar del bloque del convertidor USB-UART.

El circuito electrónico incluye los siguientes componentes electrónicos:

- **USB_B (USB tipo B):** Conector USB tipo B para conexión entre el PLC y PC.
- **R1, R2 (Resistores de Impedancia):** Resistores para control de impedancia en línea de datos.
- **U1 (TVS USB):** Circuito integrado TVS (Transient Voltage Supresor) para protección contra descargas electroestáticas (ESD).
- **C1, U2 (Convertor USB-UART):** Circuito integrado conversor de USB a UART U1 y capacitor no polarizado de desacoplo.
- **R3, R4 (Resistores de Protección):** Resistores de protección para líneas de transmisión (TXD) y recepción (RXD).

Además, se incluye indicadores luminosos en el circuito, como la figura 3.3.15.

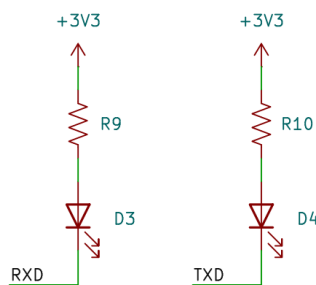


Figura 3.3.15: Diagrama esquemático preliminar de indicadores luminosos TXD y RXD.

- **R9, R10, D3, D4 (Indicadores luminosos):** LED's para visualización cuando está transmitiendo o recibiendo información el PLC a través de comunicación USB.

Se incluye auto-programación y botones de reinicio. La siguiente figura 3.3.16 muestra el diagrama esquemático que forma parte del circuito.

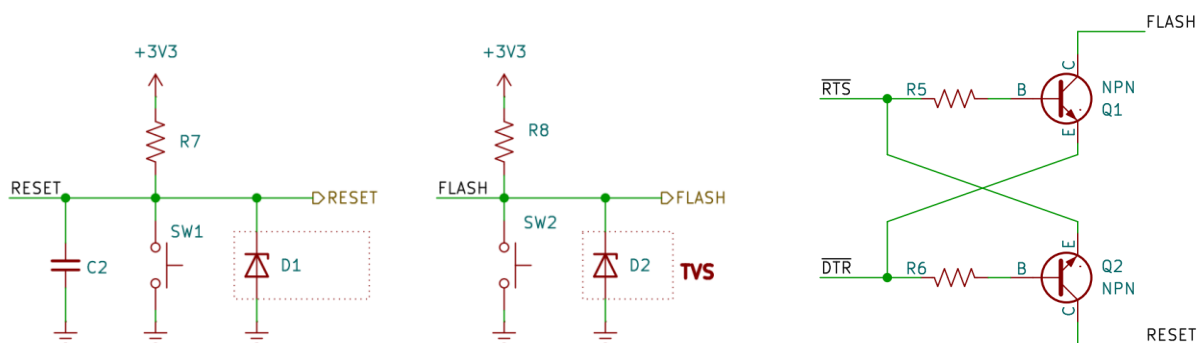


Figura 3.3.16: Diagrama esquemático preliminar de interruptores y auto-programación.

- **R7, R8, C2, SW1, SW2, D1, D2 (Reset y Flash):** Componentes electrónicos con interruptor momentáneo para reiniciar y poner en modo programación el microcontrolador ESP32 de manera manual, incluyendo protección contra ESD.
- **R5, R6, Q1, Q2 (Auto-Programación):** Componentes electrónicos para entrar en modo programación y reiniciar el microcontrolador de manera automática cuando se cargue un programa en el PLC.

- **Selección de Componentes:**

A continuación, se detallan los componentes principales y los circuitos integrados seleccionados:

- USB_B (USB tipo B):

Se ha seleccionado un conector USB tipo B debido a su alta fiabilidad y larga vida útil, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren una conexión robusta y duradera. Este tipo de conector se utiliza comúnmente en dispositivos periféricos como impresoras, escáneres y unidades externas de almacenamiento, donde la conexión y desconexión frecuentes son comunes. En la figura 3.3.17 se muestra el USB a utilizar en el PLC.

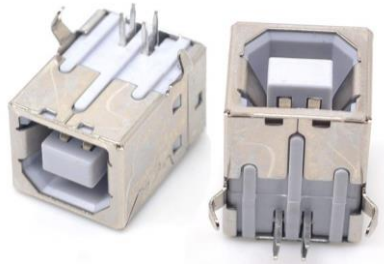


Figura 3.3.17: Conector USB tipo B de montaje PCB.

Además, el conector USB tipo B ofrece una conexión más segura gracias a su diseño que incluye lengüetas de retención, lo que minimiza la posibilidad de desconexión accidental durante el uso.

- R1, R2 (Resistores de Impedancia):

Los resistores de impedancia se han seleccionado para conectarse en las líneas de datos D+ y D- del USB con el propósito de ayudar a controlar la impedancia de la línea, asegurando una transmisión eficiente de la señal y minimizando las reflexiones.

Los resistores de impedancia se han seleccionado con un valor de $10\ \Omega$, debido a su uso común en la industria electrónica para este tipo de circuitos de conversión UART. Dado que la potencia que disiparán es mínima, se ha seleccionado el resistor con el número de parte CRCW060310R0FKEA, con un valor de $10\ \Omega$ y una tolerancia del 1%, con empaquetado en 0603.

- U1 (TVS USB):

Se ha implementado un dispositivo de protección contra descargas electrostáticas (ESD) para salvaguardar las líneas de datos D+ y D- contra posibles daños ocasionados por descargas

eléctricas estáticas. Esta medida de protección asegura la integridad de la transmisión de datos y la longevidad de los componentes conectados, fortaleciendo así la fiabilidad y la durabilidad del sistema.

El circuito integrado TVS seleccionado con número de parte USBLC6-2SC6 proporciona una protección efectiva contra descargas electrostáticas (ESD) en las líneas de datos D+ y D- del USB. Este dispositivo está diseñado específicamente para aplicaciones USB 2.0 y ofrece una alta capacidad de absorción de energía de ± 30 kV para proteger los componentes electrónicos sensibles contra sobretensiones transitorias (UWM, 2023).

Este circuito integrado incluye internamente 5 diodos TVS (ver figura 3.3.14), lo que garantiza protección para ambas líneas de datos ante voltajes ESD de picos positivos y negativos. Esta característica es fundamental para asegurar una defensa completa contra descargas electrostáticas en cualquier dirección. La figura 3.3.18 muestra el empaquetado SMD SOT23-6 en el que viene el TVS USBLC6-2SC6.



Figura 3.3.18: Empaquetado SOT23-6.

- C1, U2 (Conversor USB-UART):

Se ha seleccionado el circuito integrado CH340C para cumplir la función de conversión USB-UART. Este componente es ampliamente reconocido por su eficiencia y confiabilidad en la comunicación entre dispositivos USB y UART. Además de su rendimiento destacado, el CH340C ofrece una amplia compatibilidad con sistemas operativos y una interfaz sencilla de integrar, lo que lo hace una elección idónea para aplicaciones que requieren una conversión precisa y estable entre estos protocolos de comunicación (SparkFun, s.f.).

La figura 3.3.19 muestra el empaquetado SMD seleccionado.



Figura 3.3.19: Empaquetado SOP-16.

El circuito integrado CH340C presenta las siguientes características técnicas (WCH, 2017):

-Voltaje de alimentación: 3.3-5V

-Tasa de datos: 2Mbps

-Protocolo: USB 2.0

- R3, R4 (Resistores de Protección):

Estos resistores de protección se colocan en serie en la línea de datos TXD y RXD entre el CH340C y el ESP32 para proporcionar una protección adicional al circuito. Su función principal es limitar la corriente y proteger los componentes electrónicos contra posibles daños causados por picos de voltaje o cortocircuitos. Al limitar la corriente que fluye a través de las líneas de datos, ayudan a prevenir daños en los dispositivos conectados y garantizan una comunicación estable y confiable entre el CH340C y el ESP32.

Para el valor de los resistores de protección es de $470\ \Omega$, con numero de parte CRCW0603470RFKEA con tolerancia del 1% y empaquetado 0603. El valor de los resistores se seleccionó de acuerdo con la hoja de datos del fabricante WCH del integrado CH340 y de Espressif del SoC ESP32.

- R9, R10, D3, D4 (Indicadores luminosos):

Se han seleccionado LEDs de color amarillo de montaje superficial SMD para permitir al usuario visualizar la transmisión o recepción de información entre el PLC y la PC. Según las hojas de datos, el LED con número de parte BL-HKC36D-AV-TRB tiene un voltaje directo de 2.2 V y una corriente nominal de 20 mA (BrLED, 2022).

Dado que los LED's D3 y D4 en este circuito tienen únicamente la función de indicar visualmente, se ha optado por una corriente de 1.1 mA. El valor del resistor de límite de corriente R9 y R10 se calculó como:

$$R_{LED} = \frac{3.3\ V - 2.2\ V}{1.1\ mA} = 1\ 000\ \Omega = 1\ k\Omega$$

El resistor se ha seleccionado con numero de parte CRCW06031K00FKEA, con valor de $1\ k\Omega$ y tolerancia del 1% y empaquetado 0603.

- R7, R8, C2, SW1, SW2, D1, D2 (Reset y Flash):

Para los interruptores SW1 y SW2 se ha optado por usar de montaje superficial de tipo momentáneo normalmente abierto, como el que se presenta en la figura 3.3.20.



Figura 3.3.20: Interruptor SMD 3x4x2mm.

Los resistores R7 y R8 funcionan como resistores de pull-up para mantener el estado lógico alto en las entradas del microcontrolador de reset y flash. Cuando se presiona el interruptor, cambian de estado lógico a bajo. Por lo tanto, se ha seleccionado un valor de resistor de 10 k Ω para garantizar un adecuado funcionamiento del circuito.

El capacitor C2 se ha seleccionado para ofrecer un efecto anti-rebote, asegurando que cuando el usuario presione el interruptor, no se produzcan múltiples rebotes de la señal, como lo visto en el oscilograma de la figura 3.3.21. Esta función es fundamental para garantizar una detección precisa y estable del cambio de estado del interruptor, evitando problemas de interpretación errónea de la señal por parte del circuito.



Figura 3.3.21: Oscilograma de efecto rebote en interruptor.

El valor del capacitor se ha seleccionado para proporcionar el tiempo de retardo necesario para filtrar los rebotes de la señal y asegurar una transición limpia y sin problemas en el estado del interruptor. El capacitor seleccionado es cerámico con numero de parte CC0603KRX7R9BB104 con valor de 100 nF y tolerancia del 10% y empaquetado 0603.

Los diodos D1 y D2 se han seleccionado para proteger los componentes contra descargas electrostáticas provenientes de los interruptores cuando el usuario los presiona. Su función principal es desviar cualquier corriente transitoria generada por las descargas electrostáticas lejos de los componentes sensibles, evitando así daños en el circuito. Los diodos seleccionados para esta aplicación son los de número de parte PESD3V3, los cuales ofrecen una protección de ± 30 kV contra descargas electrostáticas, siendo bidireccionales para abordar tanto picos positivos como negativos de voltaje. Además, presentan una baja corriente de fuga, lo que garantiza una operación eficiente y confiable del circuito (UMW, 2020).

- R5, R6, Q1, Q2 (Auto-Programación):

Para la autoprogramación en el CH340, se han incluido los componentes R5, R6, Q1 y Q2. Estos elementos son fundamentales para facilitar la auto programación del CH340, permitiendo que el dispositivo se programe o reconfigure automáticamente sin intervención externa una vez que se cumplan ciertas condiciones predefinidas. Para los transistores Q1 y Q2 se seleccionaron el MMBT8050 de montaje superficial con empaquetado SOT-23. Los resistores con numero de parte CRCW060310K0FKEA con valor de 10 k Ω y tolerancia de 1%.

3.3.5 Diseño de Reloj en Tiempo Real

El diseño del reloj en tiempo real para el PLC se ha basado en un análisis detallado de los requisitos específicos del diseño de alto nivel, abordando aspectos como el respaldo de energía para almacenar el horario. Este análisis ha sido fundamental para la elaboración del diagrama esquemático preliminar del sistema, asegurando que el reloj en tiempo real cumpla con los estándares de rendimiento y fiabilidad requeridos para su correcto funcionamiento.

- ***Diagrama Esquemático:***

Se ha elaborado un diagrama esquemático preliminar, el cual se muestra en la figura 3.3.22. En esta etapa, el diagrama incluye únicamente los identificadores de cada componente (por ejemplo, D1, R1, etc.), lo que permite una visualización clara de la disposición general de los elementos del bloque RTC.

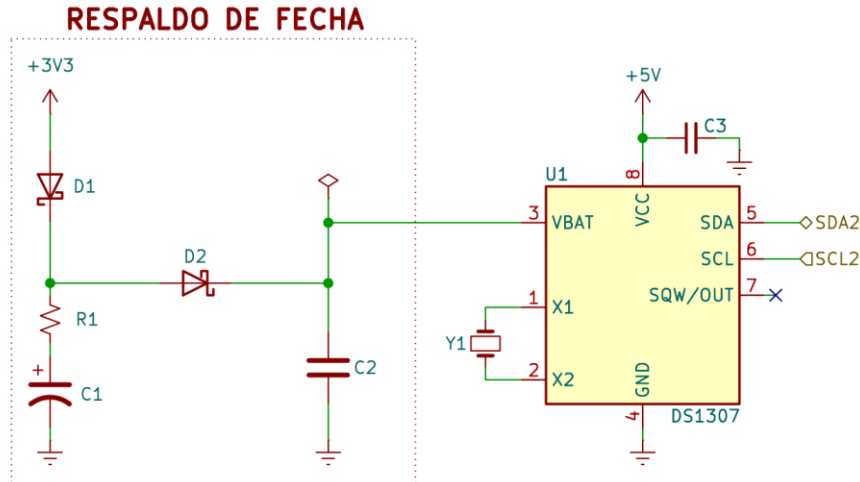


Figura 3.3.22: Diagrama esquemático preliminar del bloque de reloj en tiempo real.

El circuito electrónico incluye los siguientes componentes electrónicos:

- **D1, R1, C1, D2, C2 (Respaldo de Fecha):** Para el respaldo de fecha se utiliza un supercapacitor y componentes electrónicos para la carga del capacitor cuando el PLC está energizado. Cuando se pierde la energía, el supercapacitor suministra energía para mantener la fecha en el RTC.
- **Y1, U1 C3 (RTC I2C):** Este bloque está destinado a la gestión del reloj en tiempo real (RTC) mediante comunicación I2C, el circuito incluye cristal oscilador para proporcionar la referencia de tiempo precisa.

- **Selección de Componentes:**

Para garantizar el funcionamiento óptimo del circuito electrónico, se llevó a cabo una cuidadosa selección de componentes, considerando los requisitos técnicos y funcionales del diseño. A continuación, se detallan los componentes principales y los circuitos integrados seleccionados:

- **D1, R1, C1, D2, C2 (Respaldo de Fecha):**

Para respaldar la fecha en el circuito integrado RTC es necesario suministrarle energía de al menos 3V. Tradicionalmente, esto se logra utilizando una batería tipo botón CR2032. Sin embargo, esto conlleva la necesidad de reemplazar la batería cuando se agota, además de que su tamaño es considerable. Por lo tanto, se optó por el uso de un supercapacitor de 1 F 5.5 V, como el mostrado en la figura 3.3.23. Los supercapacitores ofrecen varias ventajas

sobre las baterías, como una vida útil más larga, una carga más rápida y una mayor resistencia a las condiciones ambientales extremas. Además, son más compactos y no requieren mantenimiento.



Figura 3.3.23: Supercapacitor de disco 1F tipo V.

El supercapacitor se carga al alimentar el PLC. Sin embargo, es fundamental considerar que cuando un capacitor está completamente descargado, se comporta como un cortocircuito a tierra. Por ende, al iniciar el proceso de carga, la corriente que atraviesa el capacitor puede alcanzar niveles muy elevados. Para mitigar este riesgo y salvaguardar la integridad del circuito, es esencial incorporar un resistor limitador de corriente. Este componente tiene la tarea de restringir la corriente máxima que fluye hacia el supercapacitor durante la fase de carga.

Por otro lado, los diodos D1 y D2 conforman una compuerta OR que garantiza un voltaje estable en la salida incluso cuando se interrumpe el suministro de energía del PLC. Dado que el suministro de energía es de 3.3V, cuando el diodo D1, siendo del tipo Schottky, presenta una caída de voltaje de aproximadamente 0.3V, los 3V restantes se dirigen hacia el capacitor. Para los diodos se seleccionó el número de parte 1N5819WS de empaquetado SOD-323.

El resistor R1 está calculado para limitar la corriente que fluye hacia el capacitor. Si el capacitor se comporta como un cortocircuito, se requiere un valor adecuado para el resistor que garantice una corriente lo suficientemente alta para una carga rápida, pero que no exceda la potencia máxima admisible por el resistor. Para el valor se seleccionó el valor de 150 Ω , el cual es un valor que ya fue utilizado en la entrada analógica de 4~20 mA.

El resistor R1 limita una corriente de cortocircuito (I_{SC}) cuando el capacitor está cargando inicialmente, la cual es:

$$I_{SC} = \frac{3\text{ V}}{150\ \Omega} = 20\text{ mA}$$

Por lo tanto, cuando el capacitor está completamente descargado el resistor R1 limitará a una corriente máxima de 20 mA. La potencia (P_R) que deberá disipar es:

$$P_R = R_1 \cdot I_{SC}^2 = 150 \, \Omega \cdot (20 \, mA)^2 = 60 \, mW$$

La potencia que disipará es de 60 mW, porque un resistor con numero de parte CRCW0805150RFKEA con valor de 150 Ω y tolerancia del 1% con empaquetado 0805.

El capacitor C2 es para mantener estable el suministro cuando ocurre un cambio en la línea de alimentación. El capacitor seleccionado es con numero de parte CC0603JRNPO9BN101 con valor de 100 nF y tolerancia del 1% con empaquetado 0603.

- Y1, U1 C3 (RTC I2C):

Para obtener una referencia de tiempo precisa, se seleccionó el circuito integrado DS1307. Este dispositivo, ampliamente reconocido por su precisión y confiabilidad, es un reloj en tiempo real (RTC) que opera a través de comunicación I2C. El DS1307 es capaz de mantener un seguimiento preciso del tiempo en formatos de horas, minutos, segundos y días de la semana, incluso durante cortes de energía prolongados. Además, ofrece una precisión de oscilación de cristal de ± 5 ppm (partes por millón), lo que garantiza una medida precisa del tiempo a lo largo del tiempo (HGSEMI, 2018). El empaquetado seleccionado es SMD SOP-8 como el de la figura 3.3.12.

El cristal oscilador (Y1) proporciona la frecuencia base para el funcionamiento del RTC, el DS1307 requiere utilizar un oscilador de 32 768 kHz asegurando una medición precisa del tiempo. El número de parte del oscilador seleccionado es YT-26-32K768, con empaquetado como el mostrado en la figura 3.3.24.



Figura 3.3.24: Oscilador de Cristal 32 768 kHz.

El capacitor C3 se utiliza para la estabilidad del circuito y la filtración de ruido en la línea de suministro del RTC, garantizando un funcionamiento óptimo del dispositivo en diversas condiciones de operación. El capacitor seleccionado es con numero de parte CC0603JRNPO9BN101 con valor de 100 nF y tolerancia del 1% con empaquetado 0603.

3.3.6 Diseño de Salidas a Relevador

El diseño salidas a relevador del PLC se ha basado en un análisis detallado de los requisitos específicos del diseño de alto nivel, abordando aspectos como la corriente que pueden manejar los relevadores y protección de la lógica de control ante voltajes inversos provenientes de la bobina de los relevadores.

- **Diagrama Esquemático:**

Se ha elaborado un diagrama esquemático preliminar, el cual se muestra en la figura 3.3.25

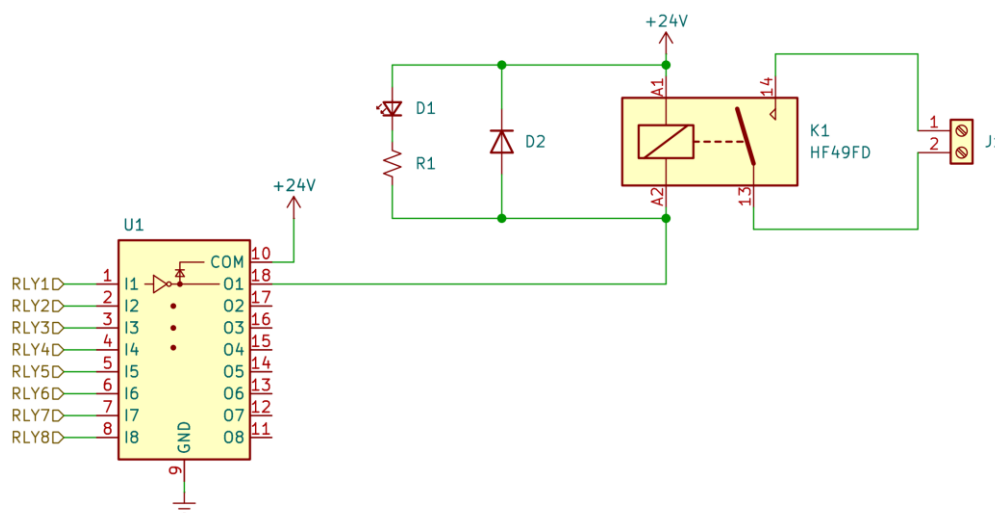


Figura 3.3.25: Diagrama esquemático preliminar del bloque de salidas a relevador.

El circuito electrónico incluye los siguientes componentes electrónicos:

- **U1 (Darlington):** Circuito integrado Darlington para manejo de cargas inductivas de 8 canales.
- **D1, R1 (Indicador de Estado):** LED's indicadores de estado actual de encendido o apagado de la bobina de cada relevador.
- **D2 (Diodo Flyback):** Diodo de protección para evitar que voltajes inversos provenientes de la bobina dañen la lógica de control.
- **K1 (Relevador):** Relevador para manejo de cargas AC y DC de un polo un tiro SPST.

- **Selección de Componentes:**

A continuación, se detallan los componentes principales y los circuitos integrados seleccionados:

- U1 (Darlington):

Para el circuito integrado Darlington se seleccionó el modelo ULN2803A debido a su capacidad para manejar cargas inductivas de hasta 500 mA y 50V, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de control de relevadores. Este dispositivo también ofrece una configuración de 8 canales, lo que permite controlar múltiples relevadores de forma eficiente en un solo chip (UMW, 2021). El empaquetado que se seleccionó se muestra en la figura 3.3.26.



Figura 3.3.26: Empaquetado SOP-18.

- D1, R1 (Indicadores de Estado):

Para los indicadores de estado, se optó por LED's de color verde como los utilizados en las entradas digitales, con numero de parte YLED0603YG. Estos LED's proporcionan una indicación visual clara del estado actual de encendido o apagado de la bobina de cada relevador. Debido a que se trata de LED's indicadores no es necesario una corriente demasiada alta, de lo contrario puede deslumbrar al usuario debido al alto brillo, se optó por utilizar una corriente de 1.4 mA. El voltaje al que se toma el voltaje de alimentación del LED es de 24 V, por lo tanto, el resistor calculado es:

$$R_{LED} = \frac{24 V - 2.4 V}{1.4 mA} = 15\,000\, \Omega$$

La potencia que disipará el resistor es:

$$R_R = R_{LED} \cdot I_{LED}^2 = 29.4\, mW$$

Por lo tanto, solo disipará una potencia de 29.4 mW, por lo que el número de parte seleccionado es CRCW060315K0FKEA con valor de 15 kΩ y tolerancia del 1% y empaquetado 0603.

- D2 (Diodo Flyback):

Para proteger la lógica de control contra voltajes inversos generados por la bobina del relevador, se seleccionó el diodo 1N4148WS, previamente utilizado en entradas analógicas

que es capaz de manejar corrientes de hasta 200 mA y voltajes de hasta 75V en inversa. Este diodo proporciona una ruta de retorno segura para la corriente generada por la bobina del relevador, evitando así daños en la electrónica de control. El circuito integrado ULN2803 internamente también posee diodos antirretornos en cada salida, sin embargo, añadir este diodo añade redundancia al circuito para proteger etapa de control ante posibles fallos.

- K1 (Relevador):

Para el relevador se seleccionó el número de parte HF49FD/024-1H12 debido a su capacidad para manejar cargas de hasta 5A a 250VAC o 5A a 30VDC. Este relevador de un polo un tiro (SPST) (HF, 2015). El relevador por utilizar se muestra en la figura 3.3.27.



Figura 3.3.27: Relevador HF49FD.

Se optó por utilizar un relevador de 24 V debido a que así no se perturba la línea de alimentación de la etapa lógica de 5 V y 3.3 V, disminuyendo así las interferencias por el encendido y apagado de las bobinas de los relevadores y su tamaño compacto lo hacen ideal.

3.3.7 Diseño de Salidas Digitales 24VDC

El diseño salidas a transistor del PLC se ha basado en un análisis detallado de los requisitos específicos del diseño de alto nivel, abordando aspectos como la corriente que pueden manejar los relevadores y protección de la lógica de control ante voltajes inversos provenientes de la bobina de los relevadores.

- **Diagrama Esquemático:**

Se ha elaborado un diagrama esquemático preliminar, el cual se muestra en la figura 3.3.28. En esta etapa, el diagrama incluye únicamente los identificadores de cada componente (por

ejemplo, D1, R1, etc.), lo que permite una visualización clara de la disposición general de los elementos del bloque de salidas digitales.

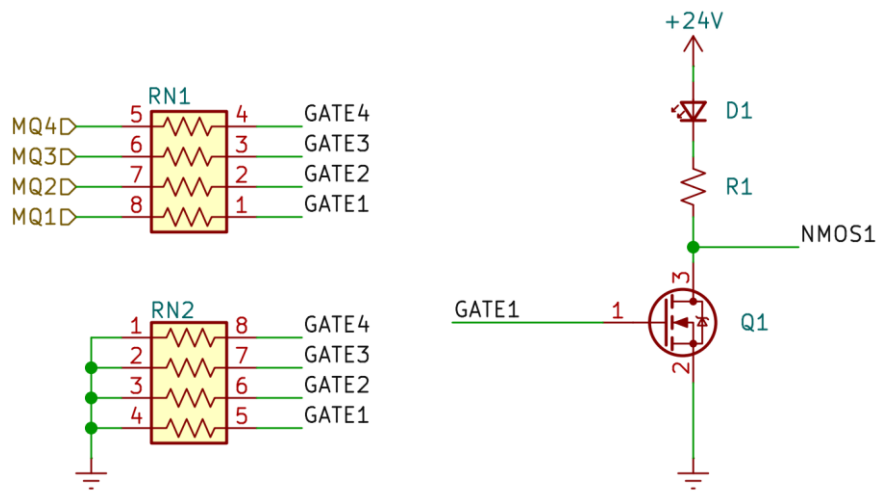


Figura 3.3.28: Diagrama esquemático preliminar del bloque de salidas a relevador.

El circuito electrónico incluye los siguientes componentes electrónicos:

- **RN1, RN2 (Red de Resistores):** Resistores en red de protección y mantener estado lógico.
- **D1, R1 (Indicador de Estado):** Indicadores visuales de estado de encendido o apagado de salida digital
- **Q1 (Transistor N-MOS):** Transistor MOSFET para manejo de cargas de corriente directa y voltajes de 24V.

- **Selección de Componentes:**

Para garantizar el funcionamiento óptimo del circuito electrónico, se llevó a cabo una cuidadosa selección de componentes, considerando los requisitos técnicos y funcionales del diseño. A continuación, se detallan los componentes principales.

- **RN1, RN2 (Red de Resistores):**

Cuando se trabaja con transistores MOSFET, no se requiere una corriente de activación para que el transistor comience a conducir corriente, a diferencia de los BJT que sí la necesitan y además requieren un valor de resistor de base. Un MOSFET opera mediante el control de voltaje en la compuerta, idealmente no consumiendo corriente. Sin embargo, debido a la capacitancia inherente en su estructura interna, el MOSFET se comporta como un capacitor que, cuando está descargado, se asemeja a un cortocircuito. Por lo tanto, al encender el

transistor a través del microcontrolador, puede generarse un pico de corriente muy elevado en un breve intervalo de tiempo, lo que podría dañar el pin de entrada/salida (GPIO). Por esta razón, es recomendable añadir un resistor en la compuerta para limitar la corriente. El valor de este resistor se puede calcular teniendo en cuenta la corriente máxima que puede proporcionar el microcontrolador ESP32 por cada pin, que según la hoja de datos es de 40 mA. No obstante, se prefiere una corriente más baja, como 10 mA, para evitar someter al pin a corrientes demasiado altas. Por lo tanto, el resistor calculado sería:

$$R_G = \frac{V_{GPIO}}{I_{max}} = \frac{3.3\text{ V}}{10\text{ mA}} = 330\ \Omega$$

Un valor de resistor de 330 Ω es el obtenido para proteger las salidas del ESP32. Con el fin de optimizar el espacio dentro de la PCB, se decidió utilizar resistores en red, como se muestra en la figura 3.3.6. Estas redes de resistores integran cuatro resistores en un único encapsulado. Dado que en este caso se requieren cuatro salidas, el uso de este tipo de encapsulado permite simplificar el diseño y reducir la cantidad de componentes individuales necesarios.

También es necesario incorporar resistores de pull-down en el circuito. Durante el arranque del microcontrolador ESP32, los GPIO pueden encontrarse en un estado de alta impedancia, lo que equivale a un estado lógico no definido. Esta situación podría resultar en la activación no deseada de los MOSFET. Los resistores en red seleccionados son con número de parte YC164-FR-0710KL con valor de 330 Ω y tolerancia del 1% y con encapsulado 0603x4 y el número de parte YC164-FR-0710KL con valor de 1 k Ω y tolerancia del 1% y con encapsulado 0603x4 como el mostrado en la figura 3.3.7.

- D1, R1 (Indicador de Estado):

Para los indicadores de estado, se optó por LED's de color verde como los utilizados en las entradas digitales y salidas a relevador, con numero de parte YLED0603YG. Estos LED's proporcionan una indicación visual clara del estado actual de encendido o apagado de la bobina de cada relevador. Debido a que se trata de LED's indicadores no es necesario una corriente demasiado alta, de lo contrario puede deslumbrar al usuario debido al alto brillo, se optó por utilizar una corriente de 1.4 mA. El voltaje al que se toma el voltaje de alimentación del LED es de 24 V, por lo tanto, el resistor calculado es:

$$R_{LED} = \frac{24\text{ V} - 2.4\text{ V}}{1.4\text{ mA}} = 15\ 000\ \Omega$$

La potencia que disipará el resistor es:

$$R_R = R_{LED} \cdot I_{LED}^2 = 15 \text{ k}\Omega \cdot (1.4 \text{ mA})^2 = 29.4 \text{ mW}$$

Por lo tanto, solo disipará una potencia de 29.4 mW, por lo que el número de parte seleccionado es CRCW060315K0FKEA con valor de 15 kΩ y tolerancia del 1% y empaquetado 0603.

- Q1 (Transistor N-MOS):

Para el transistor, como se mencionó anteriormente, se optó por utilizar MOSFET debido a su alta velocidad de respuesta y capacidad de corriente. Para este propósito, se seleccionó el transistor N-MOS de montaje superficial SOT-23 con número de parte AO3400. Este transistor ofrece características ideales para aplicaciones de conmutación de alta frecuencia y potencia, con una baja resistencia de encendido y una capacidad de corriente significativa de 5.8 A (GOODWORK, 2021).

3.3.8 Diseño de Fuente de Alimentación

El diseño del bloque de alimentación del PLC se ha basado en un análisis detallado de los requisitos específicos del diseño de alto nivel, abordando aspectos como voltajes de operación de los circuitos integrados, corrientes necesarias, protecciones e indicadores de estado.

- **Diagrama Esquemático:**

El bloque de fuente de alimentación se compone de varias etapas que a continuación se detallan.

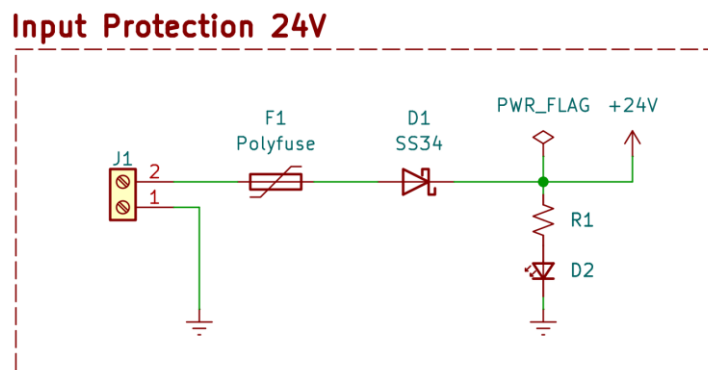


Figura 3.3.29: Diagrama esquemático preliminar de fuente de alimentación – protección de entrada.

El circuito electrónico de la figura 3.3.29 incluye los siguientes componentes electrónicos:

- **J1 (Terminal de Tornillo):** terminal de tornillo donde se conecta los elementos externos.
- **F1 (Fusible PPTC):** Fusible reinicial de protección contra sobrevoltaje y sobrecorriente en caso de funcionamiento anormal en el PLC y periféricos.
- **D1 (Diodo de Protección):** Diodo de protección en caso de polaridad inversa aplicada a la entrada del PLC.
- **R1, D2 (Indicador de Estado):** Indicador visual luminoso para mostrar correcta alimentación de 24V hacia el PLC.

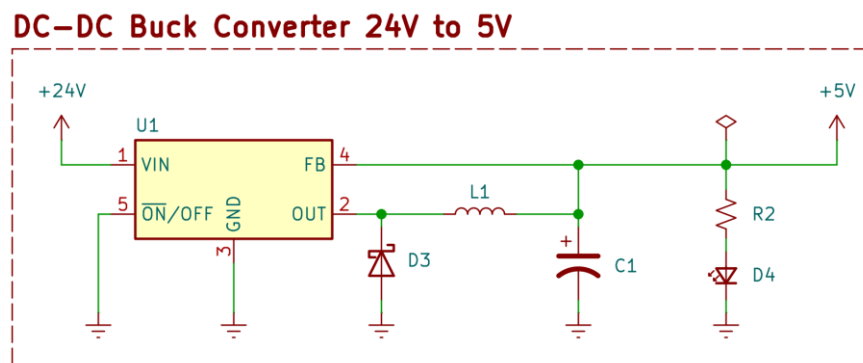


Figura 3.3.30 Diagrama esquemático preliminar de fuente de alimentación – convertidor reductor.

El circuito electrónico de la figura 3.3.30 incluye los siguientes componentes electrónicos:

- **U1, D3, L1, C1 (Regulador Reductor):** Circuito de regulación conmutada reductor de 24 V a 5 V
- **D4, R2 (Indicador de Estado):** Indicador visual luminoso de estado de funcionamiento correcto de salida de 5 V.

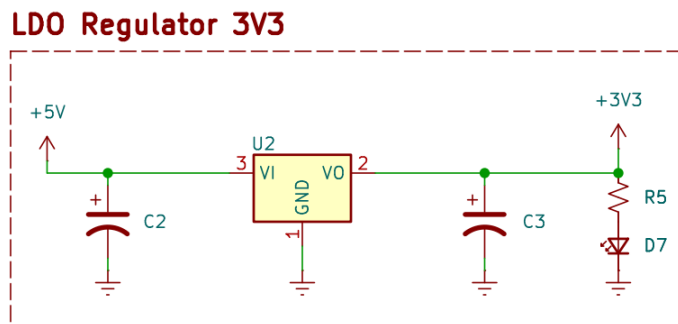


Figura 3.3.31: Diagrama esquemático preliminar de fuente de alimentación – regulador LDO.

El circuito electrónico de la figura 3.3.31 incluye los siguientes componentes electrónicos:

- **U2, C2, C3 (Regulador LDO):** Circuito de regulación de baja caída (LDO) con capacitores de baja resistencia en serie equivalente (ESR).
- **D7, R5 (Indicador de Estado):** Indicador visual luminoso de estado de funcionamiento correcto de salida de 3.3 V.

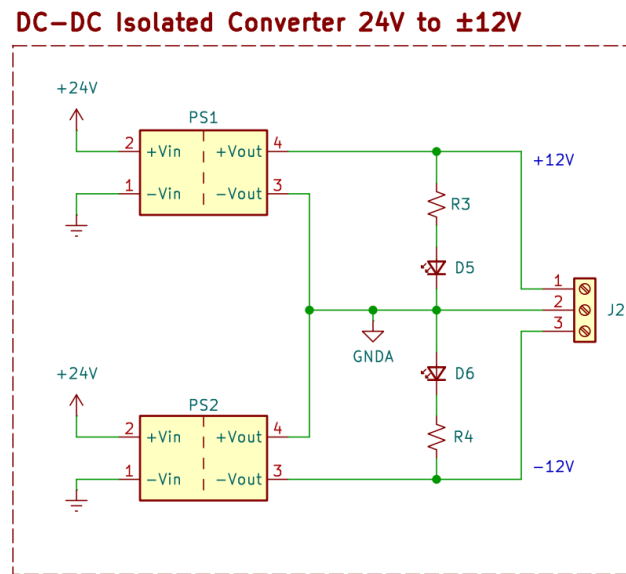


Figura 3.3.32: Diagrama esquemático preliminar de fuente de alimentación – regulador LDO.

El circuito electrónico de la figura 3.3.32 incluye los siguientes componentes electrónicos:

- **PS1, PS2 (Regulador Aislado):** Reguladores de voltaje aislado para proporcionar una tierra flotante y voltaje simétrico de $\pm 12V$.
- **R3, D5, D6, R4 (Indicador de Estado):** Indicador visual luminoso de estado de funcionamiento correcto de salida de las salidas de $\pm 12V$.

- **Selección de Componentes:**

A continuación, se detallan los componentes principales.

- **J1 (Terminal de Tornillo):**

Para realizar las conexiones eléctricas de los dispositivos externos al PLC tanto de la fuente de alimentación como de todas demás conexiones se seleccionó el terminal de tornillo con

numero de parte KF128-5.0, el cual los hay disponible de 2 pines y 3 pines, los cuales pueden unirse y formar un conector completo de más terminales, en la figura 3.3.33 se muestra la apariencia física de los conectores empleados.



Figura 3.3.33: Terminal de tornillo KF128-5.0 de 2P y 3P.

- F1 (Fusible PPTC):

Para la selección del fusible PPTC adecuado, es fundamental tener en cuenta varios criterios de diseño. Primero, es necesario determinar los parámetros de su circuito, como la corriente de funcionamiento normal, la tensión máxima de operación, la corriente máxima de interrupción y la temperatura ambiente máxima. El fusible PPTC seleccionado debe ser capaz de transportar la corriente de interrupción junto con los picos de corriente de sobrecarga esperados y la corriente de funcionamiento normal. Para el PLC se tienen las siguientes características:

- Corriente de funcionamiento normal: 1 A.
- Tensión máxima de operación: 25 V.
- Corriente máxima de interrupción 1.5 A.
- Temperatura ambiente de operación: 0 °C a 60 °C

Por lo tanto, el fusible PPTC seleccionado de acuerdo con las características y valores comerciales, es de 1.85 A y 30 V, como el mostrado en la figura 3.3.34.



Figura 3.3.34: PPTC 1.85 A 30 V.

- D1 (Diodo de Protección):

Para el diodo de protección de polaridad inversa se ha seleccionado el diodo Schottky con número de parte 1N5822. Este diodo tiene baja caída de voltaje en directa y una capacidad de manejar corrientes de hasta 3 amperios lo hacen adecuado para esta aplicación. El empaquetado que se selecciono es DO-214 como el mostrado en la figura 3.3.35.



Figura 3.3.35: Empaquetado DO-214 (SMB).

- R1, D2 (Indicador de Estado):

Para los indicadores de estado, se optó por un LED de color azul, con numero de parte YLED0603B. Debido a que se trata de LED indicador no es necesario una corriente demasiada alta, de lo contrario puede deslumbrar al usuario debido al alto brillo, se optó por utilizar una corriente de 1.4 mA. El voltaje al que se toma el voltaje de alimentación del LED es de 24 V, por lo tanto, el resistor calculado es:

$$R_{LED} = \frac{24\text{ V} - 3.2\text{ V}}{1.4\text{ mA}} = 14\,860\,\Omega \approx 15\text{ k}\Omega$$

La potencia que disipará el resistor es:

$$R_R = R_{LED} \cdot I_{LED}^2 = 15\text{ k}\Omega \cdot (1.4\text{ mA})^2 = 29.4\text{ mW}$$

Por lo tanto, solo disipará una potencia de 29.4 mW, por lo que el número de parte seleccionado para el resistor es CRCW060315K0FKEA con valor de 15 kΩ y tolerancia del 1% y empaquetado 0603.

- U1, D3, L1, C1 (Regulador Reductor):

Para el circuito integrado de regulación conmutada reductor de 24 V a 5 V se seleccionó el número de parte XL2596S-5.0E1. Este regulador fijo ofrece una solución eficiente y confiable para convertir la alta tensión de hasta 40 V de entrada a un nivel seguro y estable de 5 V según sea requerido.

El XL2596S-5.0E1 es conocido por su alta eficiencia de conversión, su capacidad para manejar corrientes de hasta 3 amperios y su amplio rango de entrada de voltaje, frecuencia de operación de 150 kHz, diseño compacto y su protección incorporada contra sobrecorriente, sobretensión y sobrecalentamiento garantizan un rendimiento seguro y estable en el circuito (XLSEMI, 2023).

El circuito electrónico ha sido diseñado tomando en cuenta la hoja de datos del fabricante XLSEMI, el circuito de aplicación típica se muestra en la figura 3.3.36.

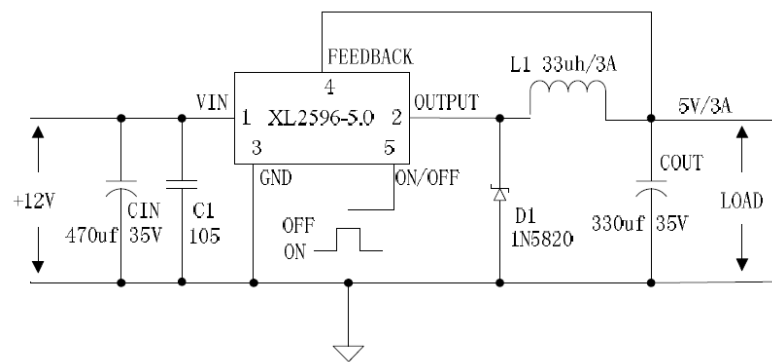


Figura 3.3.36: Circuito de aplicación típica del XL2596.

Debido a que se está ingresando un voltaje relativamente alto de 24 V, fue necesario cambiar el valor del inductor L1, este cambio se realizó tomando en cuenta la hoja de datos, en el apartado de Procedimiento de Diseño, la siguiente figura 3.3.37 muestra el valor recomendado encerrado en el recuadro rojo.

XL2596 Series Buck Regulator Design Procedure (Fixed Output)

Conditions			Inductor (L1)	Output Capacitor (COUT)			
Output Voltage (V)	Load Current (A)	Max Input Voltage (V)		Inductance (uh)	Through Hole Electrolytic		Surface Mount Tantalum
			Panasonic HFQ Series (uf/V)		Nichicon PL Series (uf/V)	AVX TPS Series (uf/V)	Sprague 595D Series (uf/V)
5	3	8	22	470/25	560/16	220/10	330/10
		10	22	560/25	560/25	220/10	330/10
		15	33	330/35	330/35	220/10	330/10
		40	47	330/35	270/35	220/10	330/10
	2	9	22	470/25	560/16	220/10	330/10
		20	68	180/35	180/35	100/10	270/10
		40	68	180/35	180/35	100/10	270/10

Figura 3.3.37: Tabla de procedimiento de diseño para XL2596 series.

El fabricante recomienda que, para el regulador de salida fija de 5 V, una corriente de carga de 2 A y un voltaje máximo de entrada de 40 V, un inductor L1 de 68 μ H.

El empaquetado que presenta el regulador es TO263-5L, como el mostrado en la figura 3.3.38.



Figura 3.3.38: Empaquetado TO263-5L.

Para las condiciones de operación se recomienda un valor de inductancia de 68 μ H. Dado que el consumo de corriente en la parte de la lógica de control del PLC no superará los 1 A, se seleccionó un inductor blindado con el número de parte CTCDRH74BF-680M. Este inductor tiene una corriente máxima de 690 mA y una inductancia de 68 μ H, con una tolerancia de $\pm 20\%$. El inductor, que es de montaje superficial, se presenta en el empaquetado mostrado en la figura 3.3.39.



Figura 3.3.39: Inductor serie CDRH74.

Para D3 se seleccionó el diodo Schottky con número de parte 1N5822, el mismo utilizado como protección de entrada de 24 V. Este diodo tiene baja caída de voltaje en directa y una capacidad de manejar corrientes de hasta 3 amperios lo hacen adecuado para esta aplicación.

Para C1 se seleccionó un capacitor electrolítico de montaje superficial SMD de 330 μ F a 35 V, con numero de parte VT1A331M-CRE54 como lo recomendado en el circuito de aplicación de la figura 3.3.36, el empaquetado SMD que presenta el capacitor se muestra en la figura 3.3.40.



Figura 3.3.40: Capacitor electrolítico SMD.

- D4, R2 (Indicador de Estado):

Para indicar que la salida está funcionando correctamente a 5 V, se optó por un LED de color rojo, con número de parte YLED0603R. Debido a que se trata de LED indicador no es necesario una corriente demasiado alta, de lo contrario puede deslumbrar al usuario debido al alto brillo, se optó por utilizar una corriente de 1.4 mA. El voltaje al que se toma el voltaje de alimentación del LED es de 5 V, por lo tanto, el resistor calculado es:

$$R_{LED} = \frac{5\text{ V} - 2\text{ V}}{1.4\text{ mA}} = 2\,143\,\Omega \approx 2.2\text{ k}\Omega$$

La potencia que disipará el resistor es:

$$R_R = R_{LED} \cdot I_{LED}^2 = 2.2\text{ k}\Omega \cdot (1.4\text{ mA})^2 = 4.3\text{ mW}$$

Por lo tanto, solo disipará una potencia de 4.3 mW, por lo que el número de parte seleccionado para el resistor es CRCW06032K20FKEA con valor de 2.2 kΩ y tolerancia del 1% y empaquetado 0603.

- U2, C2, C3 (Regulador LDO):

Debido a que el regulador XL2596S-5.0E1 opera a una frecuencia de 150 kHz, este puede generar ruido eléctrico que potencialmente afectaría el funcionamiento del microcontrolador ESP32 en el circuito. Por lo tanto, es crucial utilizar un regulador que pueda suprimir este ruido de alta frecuencia y proporcionar una salida de voltaje estable. Para cumplir con este requisito, se ha seleccionado el regulador LDO AMS1117-3.3. Este regulador lineal ofrece una salida de corriente de hasta 1 A y proporciona una regulación precisa del voltaje de salida a pesar de las variaciones en la entrada y las condiciones de carga, además de tener una alta capacidad de supresión de ruido de alta frecuencia (UMW, 2024).

El regulador es de montaje superficial y tiene un empaquetado SOT-223, como el mostrado en la figura 3.3.41.



Figura 3.3.41: Encapsulado SOT-223.

En diversos sitios web se ha destacado la importancia de utilizar capacitores de baja resistencia serie equivalente (ESR) con reguladores LDO (Aka, 2021). Los capacitores que presentan un bajo valor de ESR, como los de tantalio, son especialmente adecuados para esta aplicación. De acuerdo con la hoja de datos del fabricante del regulador, se recomienda la colocación de dos capacitores de desacoplamiento, cada uno con un valor de 10 μF , uno en la entrada y otro en la salida del regulador. Estos capacitores ayudan a estabilizar la tensión de entrada y salida del regulador, filtrando el ruido y asegurando un suministro de energía limpio y estable para los componentes del circuito. La figura 3.3.42 muestra la apariencia física del capacitor de montaje superficial de tantalio a utilizar.



Figura 3.3.42: Encapsulado de capacitor de tantalio SMD.

Es importante mencionar que estos capacitores tienen polaridad, conectarlos a un voltaje inverso o superior al establecido puede ocasionar que el capacitor explote. El capacitor seleccionado para C2 y C3 es con el número de parte T494B106K025AT el cual tiene una capacitancia de 10 μF y un voltaje de operación máxima de 25 V.

- D7, R5 (Indicador de Estado):

Para indicar que la salida está funcionando correctamente a 3.3 V, se optó por un LED de color rojo, con numero de parte YLED0603R. Debido a que se trata de LED indicador no es necesario una corriente demasiado alta, de lo contrario puede deslumbrar al usuario debido al alto brillo, se optó por utilizar una corriente de 1.4 mA. El voltaje al que se toma el voltaje de alimentación del LED es de 5 V, por lo tanto, el resistor calculado es:

$$R_{LED} = \frac{3.3\text{ V} - 2\text{ V}}{1.4\text{ mA}} = 928\ \Omega \approx 1\text{ k}\Omega$$

La potencia que disipará el resistor es:

$$R_R = R_{LED} \cdot I_{LED}^2 = 1\text{ k}\Omega \cdot (1.4\text{ mA})^2 = 1.96\text{ mW}$$

Por lo tanto, solo disipará una potencia de 1.96 mW, por lo que el número de parte seleccionado para el resistor es CRCW06031K00FKEA con valor de 1 kΩ y tolerancia del 1% y empaquetado 0603.

- PS1, PS2 (Regulador Aislado):

Para cumplir con el requisito de obtener una salida de voltaje simétrico de ± 12 V, es necesario emplear reguladores aislados. Estos dispositivos separan eléctricamente la entrada de la salida, lo que permite crear una referencia de tierra común entre ambos reguladores. Al conectar dos reguladores de este tipo en serie y tomar la unión entre ellos como referencia de tierra, se puede obtener un voltaje simétrico en la salida. Para esta aplicación, se ha seleccionado el regulador aislado con número de parte B2412S-1W, el cual se a la entrada recibe 24 V provenientes de la alimentación principal y a la salida se obtienen 12 V, la corriente máxima que puede obtenerse es 84 mA y una potencia máxima de 1 W (LZTEC, 2017).

La figura 3.3.43 muestra la apariencia física del regulador aislado.



Figura 3.3.43: Regulador DC-DC aislado.

- R3, D5, D6, R4 (Indicador de Estado):

Para indicar que la salida simétrica está funcionando correctamente a ± 12 V, se optó por un LED de color amarillo, con numero de parte YLED0603YG. El voltaje al que se toma el voltaje de alimentación del LED es de 5 V y una corriente de 1.3 mA, el resistor calculado es:

$$R_{LED} = \frac{12\text{ V} - 2.1\text{ V}}{1.3\text{ mA}} = 7\,538\,\Omega \approx 7.5\text{ k}\Omega$$

El número de parte seleccionado para el resistor R3 y R4 es CRCW06037K50FKEA con valor de 7.5 kΩ y tolerancia del 1% y empaquetado 0603.

3.3.9 Diseño de Microcontrolador ESP32

El diseño del bloque del microcontrolador ESP32 del PLC se ha basado en un análisis detallado de los requisitos específicos del diseño de alto nivel, abordando aspectos como los capacitores de desacoplo, reinicio al encender y resistores del bus I2C.

- **Diagrama Esquemático:**

Se ha elaborado un diagrama esquemático preliminar, el cual se muestra en la figura 3.3.44. En esta etapa, el diagrama incluye únicamente los identificadores de cada componente (por ejemplo, D1, R1, etc.).

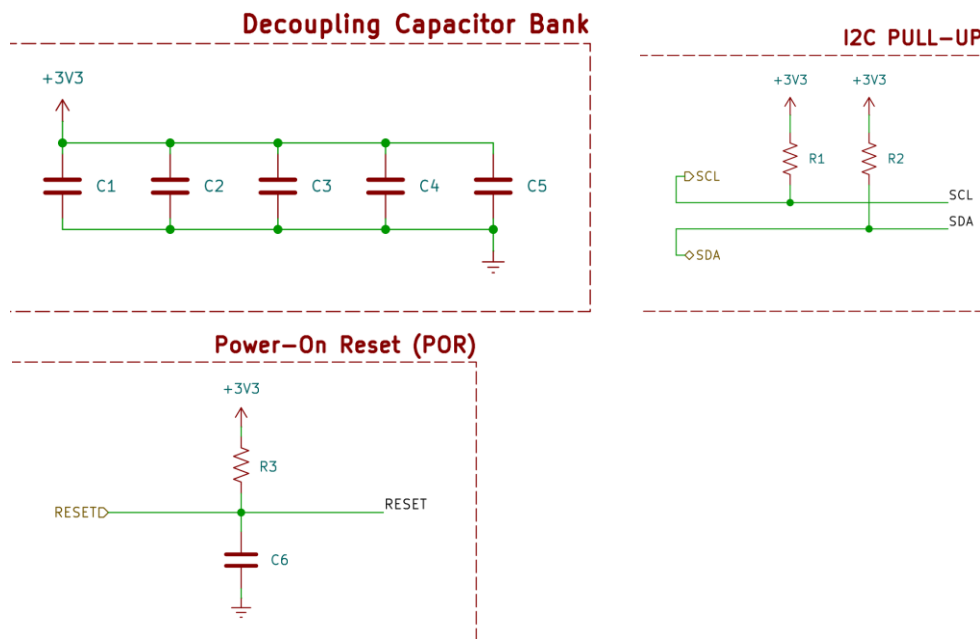


Figura 3.3.44: Diagrama esquemático preliminar del bloque de elementos del ESP32.

El circuito electrónico incluye los siguientes componentes electrónicos:

- **C1, C2, C3, C4, C5 (Banco de Capacitores):** Estos capacitores de desacoplo están diseñados para proporcionar una alimentación estable de 3.3 V al microcontrolador ESP32, filtrando cualquier ruido o fluctuación en la alimentación.
- **R1, R2 (Resistores Pull-Up I2C):** Estos resistores de pull-up se utilizan en la línea de comunicación I2C para garantizar una transmisión confiable de datos entre dispositivos.
- **R3, C6 (Power On Reset):** Este circuito, compuesto por un resistor y un capacitor, proporciona una señal de restablecimiento al sistema cuando se enciende.

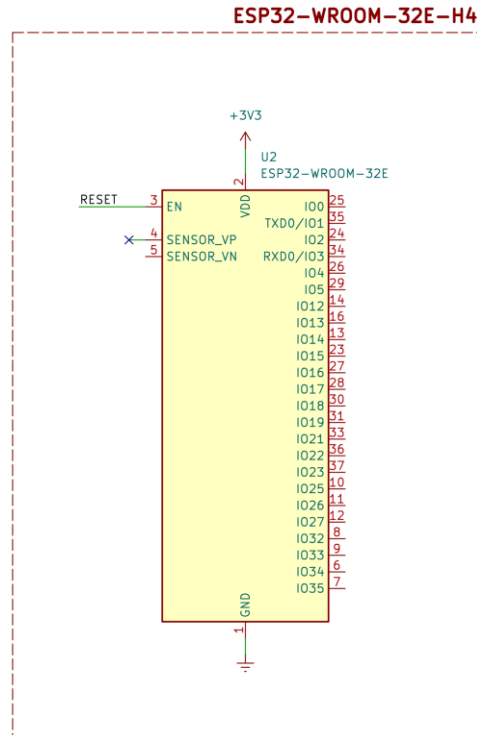


Figura 3.3.45: Diagrama esquemático preliminar del microcontrolador SoC ESP32.

- **U1 (ESP32):** Este componente representa el microcontrolador ESP32, un dispositivo con un procesador de doble núcleo, conectividad Wi-Fi y Bluetooth, memoria flash integrada y una amplia variedad de periféricos de entrada/salida (GPIO), todo en un solo chip.

- **Selección de Componentes:**

Para garantizar el funcionamiento óptimo del circuito electrónico, se llevó a cabo una cuidadosa selección de componentes, considerando los requisitos técnicos y funcionales del diseño. A continuación, se detallan los componentes principales.

- **C1, C2, C3, C4, C5 (Banco de Capacitores):**

Según la hoja de datos del fabricante Espressif, se recomienda la inclusión de capacitores de desacoplo cerca de los pines de alimentación del ESP32 para filtrar el ruido y garantizar una alimentación estable. En este diseño, se han incorporado tres capacitores de 100nF y dos de 10uF para cumplir con estos requisitos. Los capacitores de 100nF son ideales para filtrar ruido de alta frecuencia, mientras que los capacitores de 10uF proporcionan filtrado adicional para

componentes de baja frecuencia, asegurando así un suministro de energía limpio y sin fluctuaciones para el ESP32.

Los capacitores C3, C4 y C5 se ha seleccionado el número de parte CC0805KRX7R9BB104 de valor de 100 nF con empaquetado 0805. Los capacitores C1 y C2 se seleccionaron con numero de parte CC0805KRX7R9BB106 de valor de 10 μ F y empaquetado 0805.

- R1, R2 (Resistores Pull-Up I2C):

Estos resistores de pull-up se utilizan en el bus I2C para asegurar un nivel lógico alto cuando los dispositivos conectados al bus no están transmitiendo datos. Según las especificaciones del protocolo I2C, se requiere un resistor de pull-up en la línea SDA y otro en la línea SCL. En este diseño, se ha optado por un valor de 4.7 k Ω para garantizar una comunicación estable y confiable en el bus I2C. Los resistores de pull-up se ha seleccionado el numero parte CRCW06034K70FKEA con valor de 4.7 k Ω y tolerancia del 1% con empaquetado 0603.

- R3, C6 (Power On Reset):

Estos componentes forman parte del circuito de restablecimiento (Power On Reset, POR) y son fundamentales para garantizar un inicio controlado y confiable del sistema. De acuerdo con la hoja de datos del fabricante Espressif, se recomienda una configuración típica para el circuito RC de retardo, donde se utiliza un resistor de 10 k Ω y un capacitor de 1 μ F. Esta configuración asegura un tiempo de retardo adecuado para el restablecimiento del microcontrolador después de la aplicación de la alimentación, garantizando así un arranque estable y sin problemas.

El resistor R3 se seleccionó con numero de parte CRCW060310K0FKEA con valor de 10 k Ω y tolerancia del 1% y empaquetado 0603. El capacitor C6 se seleccionó con numero de parte CC0805KRX7R9BB105 con valor de 1 μ F y empaquetado 0603.

- U1 (ESP32):

El microcontrolador principal del sistema seleccionado es el ESP32-WROOM-32E-H4 que cuenta con una serie de características destacadas que lo hacen ideal para aplicaciones IoT y sistemas embebidos. La figura 3.3.46 muestra el SoC ESP32 seleccionado.



Figura 3.3.46: ESP32-WROOM-32E-H4.

El ESP32-WROOM-32E-H4 presenta un procesador Xtensa de doble núcleo a 32 bits con una velocidad de hasta 240 MHz, junto con una memoria integrada de 448 KB de ROM y 520 KB de SRAM, además de 16 KB de SRAM en RTC. En términos de conectividad, ofrece soporte para Wi-Fi 802.11b/g/n con una velocidad de hasta 150 Mbps, así como Bluetooth V4.2 BR/EDR y Bluetooth LE.

En cuanto a periféricos, incluye una amplia gama de interfaces como UART, SPI, SDIO, I2C, LED PWM, Motor PWM, I2S, IR, contador de pulsos, GPIO, sensor táctil capacitivo, ADC, DAC, y TWAI® para compatibilidad con CAN Specification 2.0. El ESP32-WROOM-32E-H4 opera en un rango de voltaje de 3.0 ~ 3.6 V y en condiciones ambientales de temperatura de -40 ~ 105 °C. Además, ha sido sometido a una serie de pruebas de fiabilidad que garantizan su desempeño bajo diversas condiciones de operación (Espressif, 2023)

3.3.10 Validación de Diseño

Antes de pasar al diseño detallado, es fundamental validar el diseño de cada bloque para garantizar su correcto funcionamiento. En esta etapa, dentro del área de Investigación, se llevó a cabo el montaje del circuito electrónico siguiendo los diagramas previamente elaborados en una placa de pruebas. En este nivel de pruebas, se han utilizado componentes electrónicos equivalentes para facilitar el montaje en la placa de pruebas. En algunos casos, se montaron los componentes SMD en adaptadores específicos diseñados para facilitar su inserción en la placa de pruebas. Este proceso de validación permitió identificar posibles errores de diseño y evaluar el rendimiento de los componentes seleccionados.

En la figura 3.3.47 se muestra una fotografía tomada en el área de investigación durante las pruebas de rendimiento del bloque de entradas digitales. Durante estas pruebas, el circuito fue sometido a diferentes señales utilizando un generador de funciones.

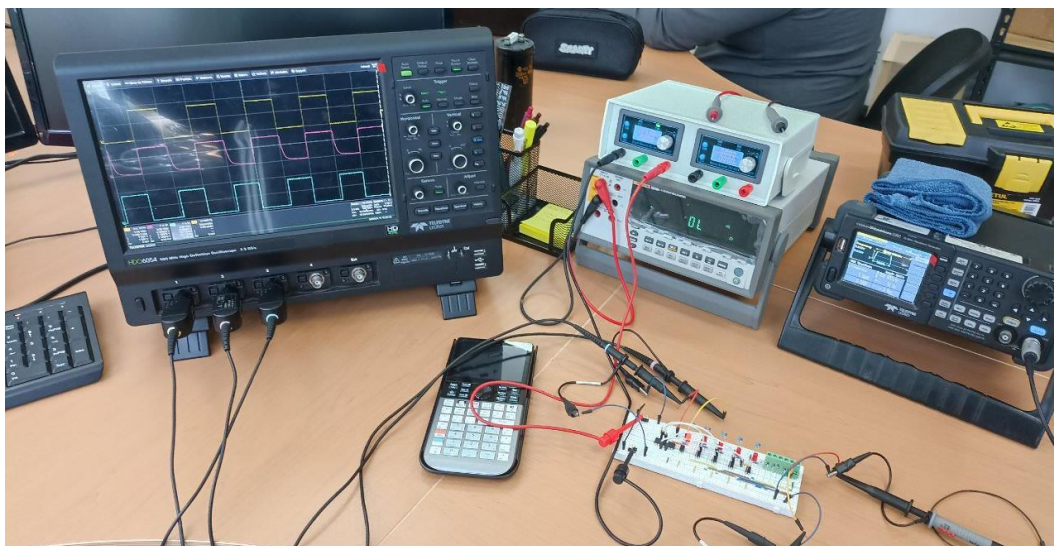
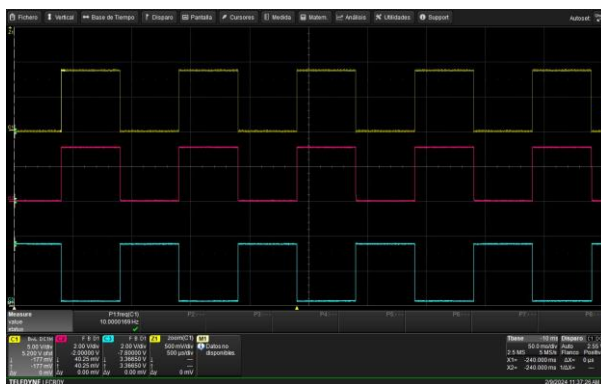


Figura 3.3.47: Pruebas a nivel prototipo de entradas digitales de 24 V.

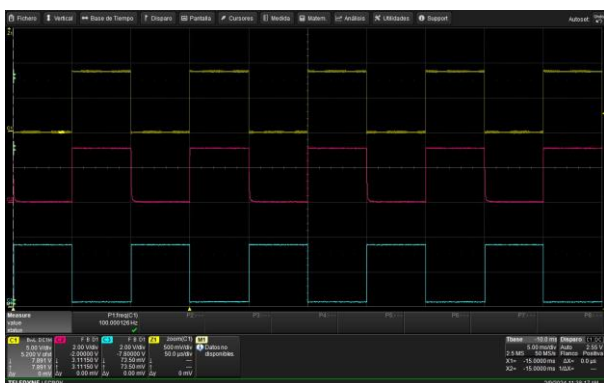
Las figuras 3.3.48 presentan los oscilogramas obtenidos del osciloscopio durante las pruebas de rendimiento. En cada figura, la onda amarilla representa la señal proveniente del generador de funciones, la onda púrpura muestra la señal después del optoacoplador y la onda azul representa la señal después de pasar por la compuerta NOT Schmitt trigger.



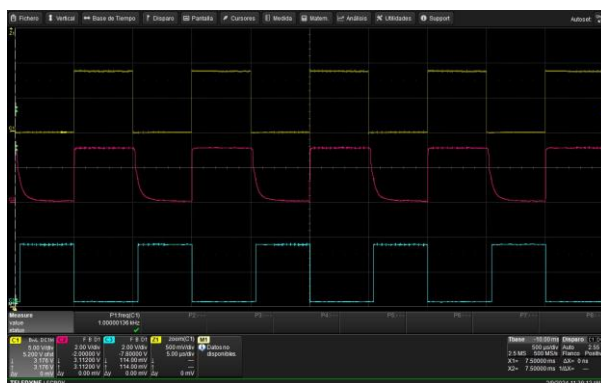
(a)



(b)



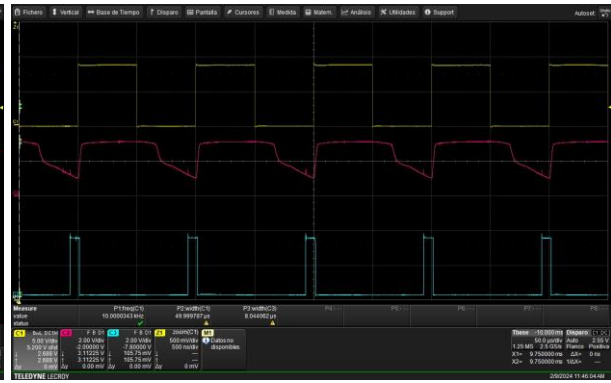
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.3.48: Frecuencias de prueba, (a)1 Hz, (b)10 Hz, (c)100 Hz, (d)1 kHz, (e)5 kHz, (f)10 kHz.

A medida que avanzan las figuras de 3.3.48, se observa cómo la forma de onda púrpura se va distorsionando debido a la capacitancia propia del circuito del optoacoplador. Sin embargo, la señal procesada por la compuerta NOT Schmitt trigger permanece limpia y sin distorsiones. Este fenómeno demuestra la efectividad de la compuerta NOT Schmitt trigger para eliminar el ruido y restaurar la forma de onda original de forma parcial, ya que una señal sin filtrar como la onda púrpura no podría ser medida correctamente por microcontrolador ESP32.

En la figura 3.3.49 se muestra el circuito electrónico del bloque de entradas analógicas montado en la placa de pruebas. El circuito fue sometido a pruebas con una señal tipo rampa.

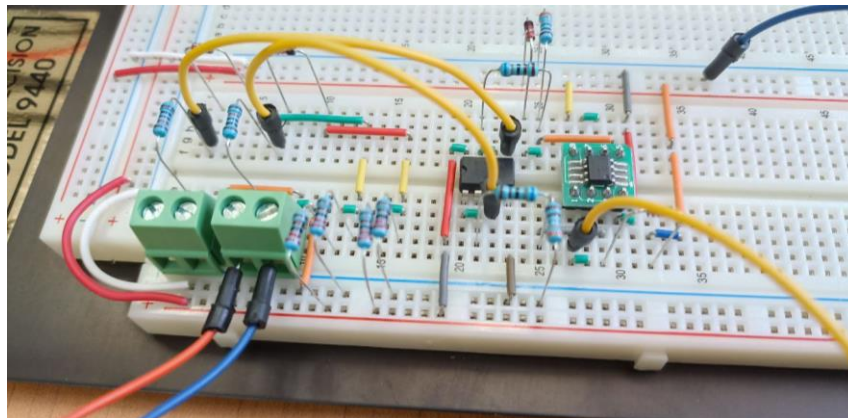


Figura 3.3.49: Circuito electrónico de entradas analógicas 0~10 V.

Las figuras de 3.3.50 presentan los oscilogramas obtenidos del osciloscopio durante las pruebas de rendimiento. En cada figura, la onda amarilla representa la señal proveniente del generador de funciones de 0 V a 10 V, la onda púrpura muestra la señal a la salida de circuito.

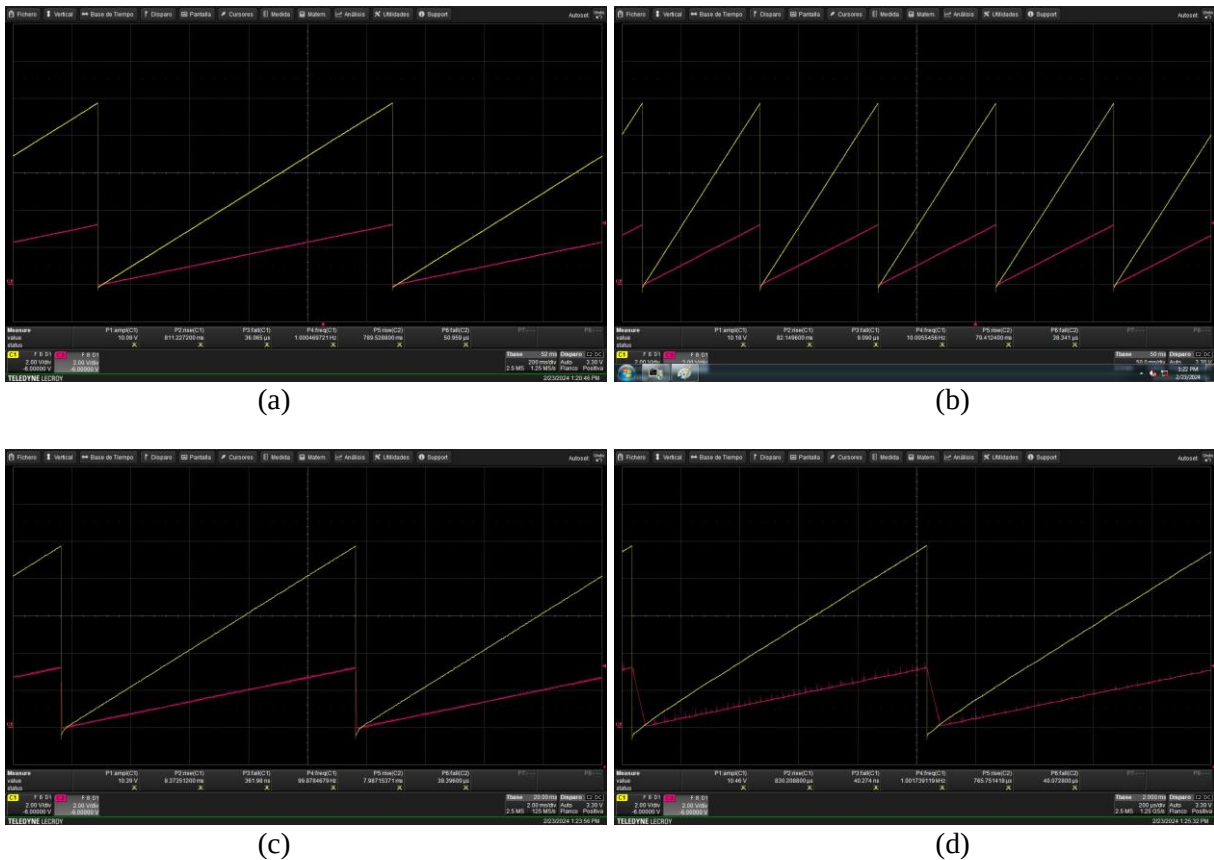


Figura 3.3.50: Frecuencias prueba: (a)1 Hz, (b)10 Hz, (c)100 Hz, (d)1 kHz.

Se realizaron pruebas con diferentes frecuencias de señal de rampa, incluyendo 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz y 1 kHz. Los resultados de estas pruebas se visualizan en la figura 3.3.50. Se observó que la forma de onda de la señal de salida (onda púrpura) se mantiene lineal de 0 V a 3.3 V y se mantuvo estable en todas las frecuencias probadas.

La figura 3.3.51 muestra el circuito electrónico de la entrada analógica de 4~20 mA montada en la placa de pruebas.

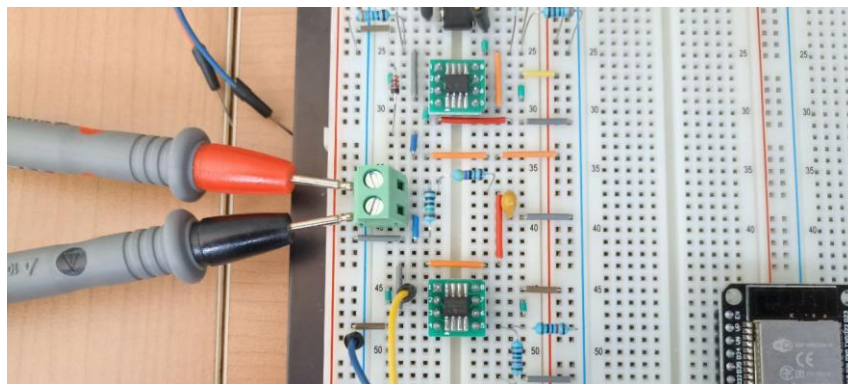


Figura 3.3.51: Circuito electrónico de entradas analógicas 4~20 mA.

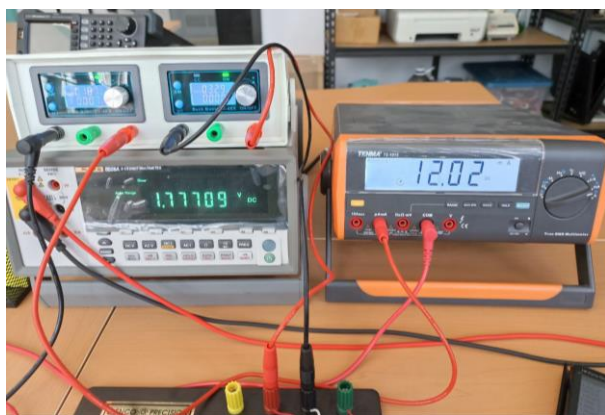
En las figuras 3.3.52 se presenta el circuito electrónico bajo pruebas con distintas corrientes, variando desde 4 mA hasta 20 mA. La corriente aplicada se mide utilizando el multímetro de banco color naranja ubicado a la derecha de las imágenes, mientras que el voltaje de salida resultante es medido por el multímetro de banco color blanco situado a la izquierda.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.3.52: Corriente de pruebas: (a)4 mA, (b)8 mA, (c)12 mA, (d)15 mA, (e)16 mA, (f)20 mA.

En las figuras (a) a (f) de la figura 3.3.52 se muestran distintos valores de corriente aplicados al circuito, variando desde 4.04 mA hasta 20.02 mA en incrementos progresivos. Cada figura representa un punto de datos específico, donde se mide tanto la corriente aplicada como el voltaje resultante a la salida del circuito, se observa que va incrementado de manera lineal el voltaje respecto a la corriente aplicada en el bucle.

La figura 3.3.53 muestra el circuito electrónico de las salidas a relevador ensamblado en la placa de pruebas.

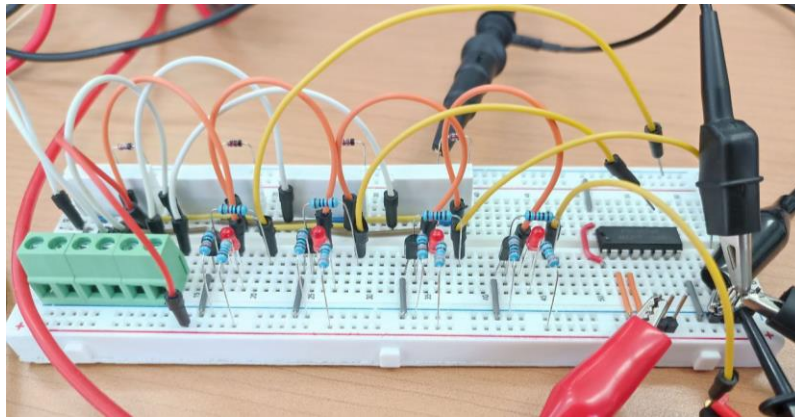


Figura 3.3.53: Circuito electrónico de salidas a relevador.

La figura 3.3.54 se presenta el circuito electrónico completamente ensamblado en las placas de pruebas junto con dispositivos de prueba como el semáforo e interruptores, donde se llevaron a cabo diversas pruebas para evaluar el funcionamiento óptimo de cada bloque del circuito. Los resultados obtenidos de estas pruebas indicaron que el circuito cumplía con los requisitos establecidos, lo que permitió su aprobación para avanzar al diseño detallado.

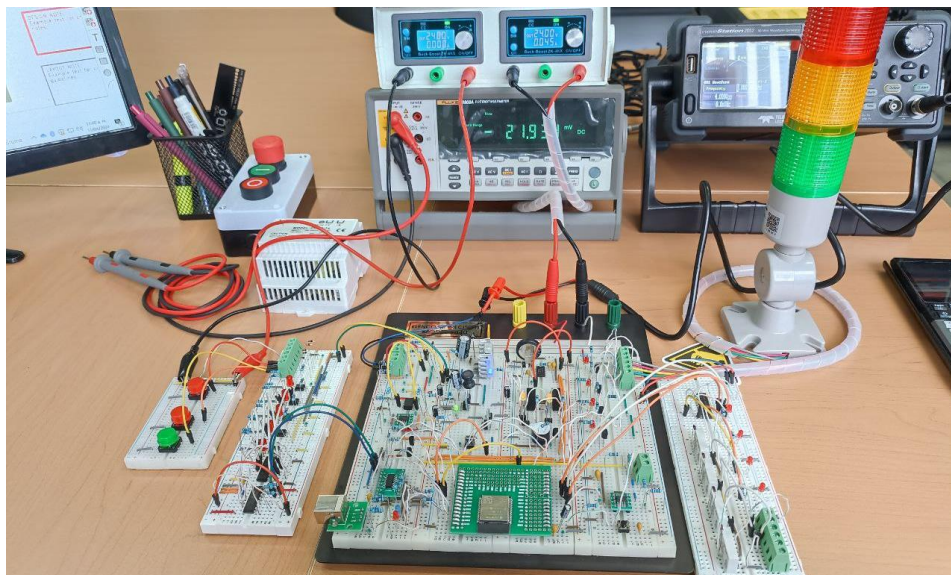


Figura 3.3.54: Circuito electrónico completo en fase de pruebas.

3.4 Diseño Detallado

En la etapa de Diseño Detallado se lleva a cabo la elaboración de los diagramas esquemáticos finales y el diseño de la PCB utilizando el software KiCAD. Durante este proceso, se aplican las normativas IPC, reconocidas en la industria electrónica, para garantizar la calidad y la integridad del diseño. Este es un paso crítico donde cada detalle se examina cuidadosamente para asegurar que el producto final cumpla con los estándares requeridos y las especificaciones del proyecto.

3.4.1 Creación de Proyecto

En esta fase, se inicia la creación del proyecto que abarcará la elaboración de los diagramas esquemáticos y el diseño de la PCB. Se ha elegido el software de diseño electrónico KiCad por su versatilidad y amplia aceptación en la industria. KiCad ofrece una amplia gama de herramientas que facilitan la creación de esquemas y diseños de PCB de alta calidad. Además, su naturaleza de código abierto y su comunidad activa proporcionan soporte y recursos valiosos para los diseñadores durante todo el proceso (ALFAIOT, 2023).

A continuación, se describen los pasos seguidos para la creación del proyecto dentro de KiCAD.

- Abrir KiCad y crear un nuevo proyecto, en *File>New Project*, como se muestra en la figura 3.4.1.

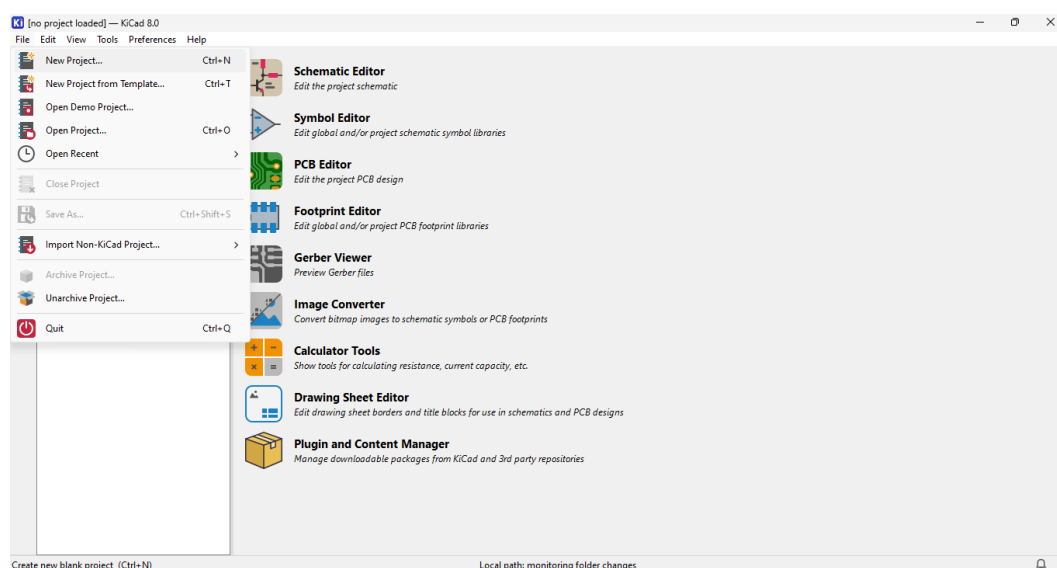


Figura 3.4.1: Creación de nuevo proyecto en KiCad.

- El siguiente paso es nombrar el proyecto y guardarlo en una carpeta como se muestra en la figura 3.4.2. En este caso, el proyecto se nombró con el número E947038 y se guardó en la nube de almacenamiento de Microsoft, ofrecida por el Instituto, para asegurar la sincronización y el respaldo del archivo

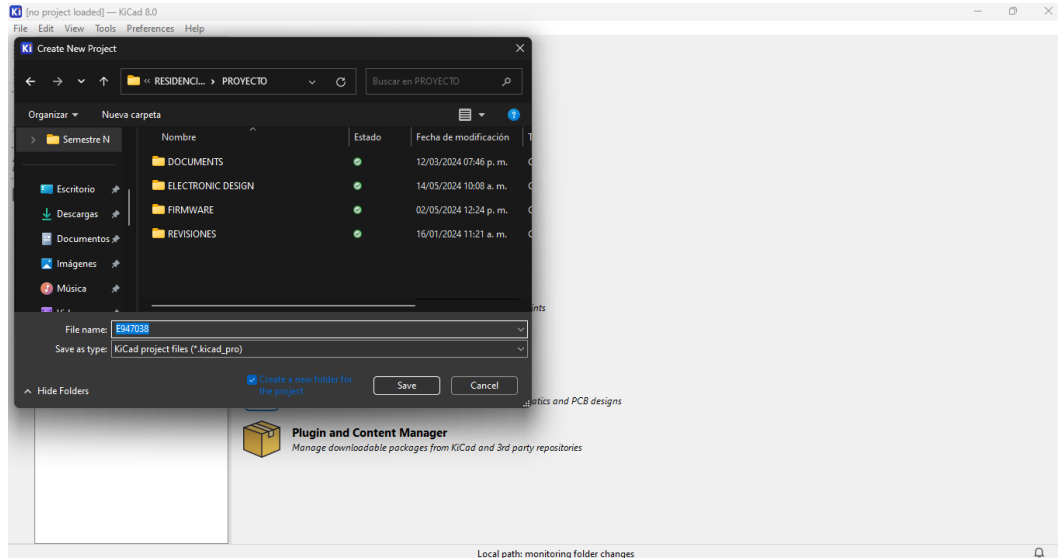


Figura 3.4.2: Creación de nuevo proyecto en KiCad.

- Una vez creado el proyecto, se crearán dos archivos: uno para la creación de los diagramas esquemáticos en el Schematic Editor y otro para la creación de la PCB en el PCB Editor, como se muestra en la figura 3.4.3.

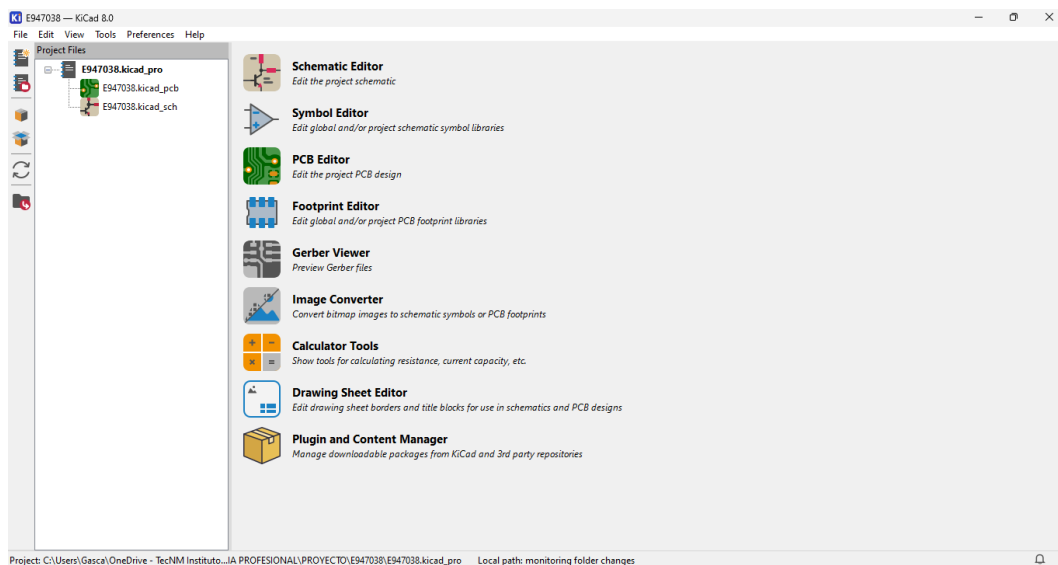


Figura 3.4.3: Archivos del proyecto generados.

El software ofrece una variedad de herramientas esenciales para el diseño electrónico. Estas incluyen el *Symbol Editor*, que permite la creación de símbolos esquemáticos, y el *Footprint Editor*, diseñado para editar las huellas de los componentes electrónicos en la PCB. Además, cuenta con el *Gerber Viewer* para la visualización de archivos de fabricación, y el *Image Converter*, que permite convertir imágenes de un formato a otro para su integración en los esquemas y la PCB.

Para facilitar los cálculos técnicos, el software cuenta con *Calculator tools*, que proporciona herramientas para realizar cálculos de ancho de pistas, control de impedancia, y otros parámetros conforme a las normativas IPC, como se aprecia en la figura 3.4.4.

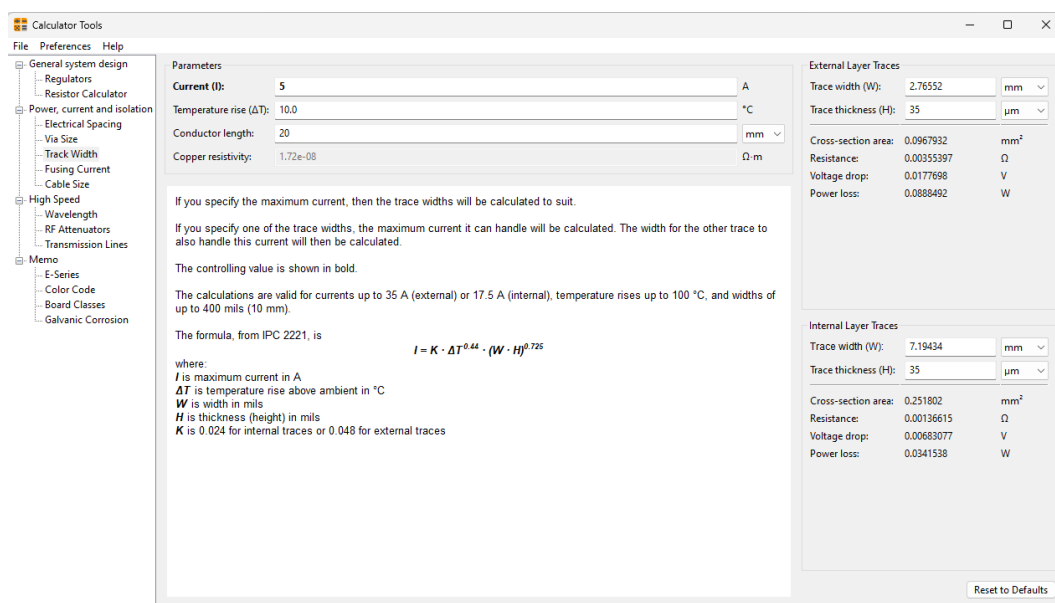


Figura 3.4.4: Herramienta para cálculos de acuerdo con normas IPC.

También cuenta con el *Drawing Sheet Editor*, que permite la creación de hojas de bloque de título para agregar información relevante al proyecto. Finalmente, el Plugin and Content Manager ofrece una amplia gama de plugins diseñados para agilizar y mejorar el flujo de trabajo del diseñador electrónico.

3.4.2 Diagrama esquemático

- **Creación de Bloque de Título:**

Antes de proceder en los diagramas esquemáticos, es una buena técnica de diseño crear el bloque de título, el cual proporciona una identificación clara y completa del documento. Establecer este bloque de asegura una correcta gestión de versiones y cambios, facilitando así la comunicación entre los miembros del equipo y otros interesados, y sirve como referencia rápida y clara sobre el contenido y el propósito del documento.

El bloque de título se elaboró de acuerdo con la norma ANSI, que establece qué información debe incluirse en él. Este bloque es fundamental en la documentación técnica, ya que proporciona una identificación clara del documento o diagrama. Según la norma, el bloque de título debe contener información como el nombre de la empresa u organización, el logo correspondiente, el título del proyecto, el número de dibujo (un identificador único del archivo) y el número de revisión (que cuenta las revisiones actuales del componente). Además, la norma también sugiere incluir información sobre la escala del dibujo, el tamaño del dibujo o de la hoja original, y las firmas o iniciales del dibujante (ENG), asesor interno (INT), asesor externo (EXT) junto con las fechas respectivas, la plantilla diseñada se muestra en la figura 3.4.5.

The image shows a screenshot of the 'ANSI_TITLE-BLOCK' window in the Drawing Sheet Editor. The window contains a template for an ANSI title block. The template is divided into several sections:

- Validation:** Includes a field for the issue date: `${ISSUE_DATE}`.
- Project:** Includes a field for the project name: `${PROJECT}`.
- Project Revision:** Includes a field for the project revision: `${PROJECT_REVISION}`.
- Title:** Includes a field for the title: `${TITLE}`.
- Approvals:** Includes a field for approvals: `APPROVALS`.
- Date:** Includes a field for the date: `DATE`.
- Scale:** Includes a field for the scale: `SCALE 1:1`.
- File Name:** Includes a field for the file name: `FILE NAME ${FILENAME}`.
- Sheet:** Includes a field for the sheet number: `SHEET: ${#}/${##}`.
- Revision:** Includes a field for the revision: `REV: ${REVISION}`.

The template also features logos for the Instituto Tecnológico Nacional de México and the Instituto Tecnológico de Apaxtla. The window includes a menu bar (File, Edit, View, Place, Inspect, Preferences, Help) and a toolbar with various drawing tools. The status bar at the bottom shows the current drawing sheet dimensions and scale.

Figura 3.4.5: Bloque de título realizado en base a norma ANSI.

En el editor de hoja de dibujo de KiCad se realizó el bloque de título siguiendo la normativa ANSI, aquí se colocan los designadores que más adelante se pueden editar en la hoja de esquemática agregando la información correspondiente.

- **Creación de Hojas Jerárquicas:**

Debido a que se trata de un proyecto bastante extenso con varios bloques, que incluye el circuito electrónico de PLC IIoT, es necesario dividir el proyecto en hojas jerárquicas para una mejor organización y manejo. Estas hojas jerárquicas estarán interrelacionadas de manera similar a la estructura de directorios de una computadora. Una hoja superior enlazará varias hojas de nivel inferior, para este proyecto, dado que ya se ha dividido el proyecto en bloques, cada hoja jerárquica vendrá a representar un bloque.

Las hojas jerárquicas se componen mediante el uso de etiquetas que facilitan la conexión entre las diferentes hojas. KiCad proporciona iconos específicos que se utilizan para este propósito, como se muestra en la Figura 3.4.6. Estos iconos, de arriba a abajo, son: etiqueta de red, etiqueta global, etiqueta jerárquica, hoja jerárquica y pin de hoja jerárquica de importación. Las etiquetas jerárquicas permiten vincular entradas y salidas entre las hojas inferiores, además de especificar la capa actual. Las etiquetas globales, por otro lado, se pueden aplicar a cualquier hoja sin necesidad de una conexión explícita, mientras que las etiquetas de red están disponibles para conexiones dentro de una hoja, si es necesario.

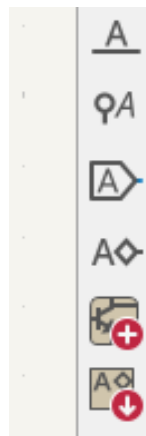


Figura 3.4.6: Iconos de etiquetas en menú lateral en KiCad.

Para comenzar con la creación de hojas jerárquicas en KiCad, se pueden utilizar comandos simples, como el atajo 's' para agregar una hoja de jerarquía de nivel inferior a un esquema. Una vez creada la hoja, se puede ingresar a ella para agregar componentes, conexiones y más hojas según sea necesario. Además, se pueden agregar etiquetas jerárquicas para facilitar la comunicación entre las hojas. La figura 3.4.7 muestra la hoja jerárquica principal del diagrama esquemático, donde cada bloque representa una hoja en el archivo.

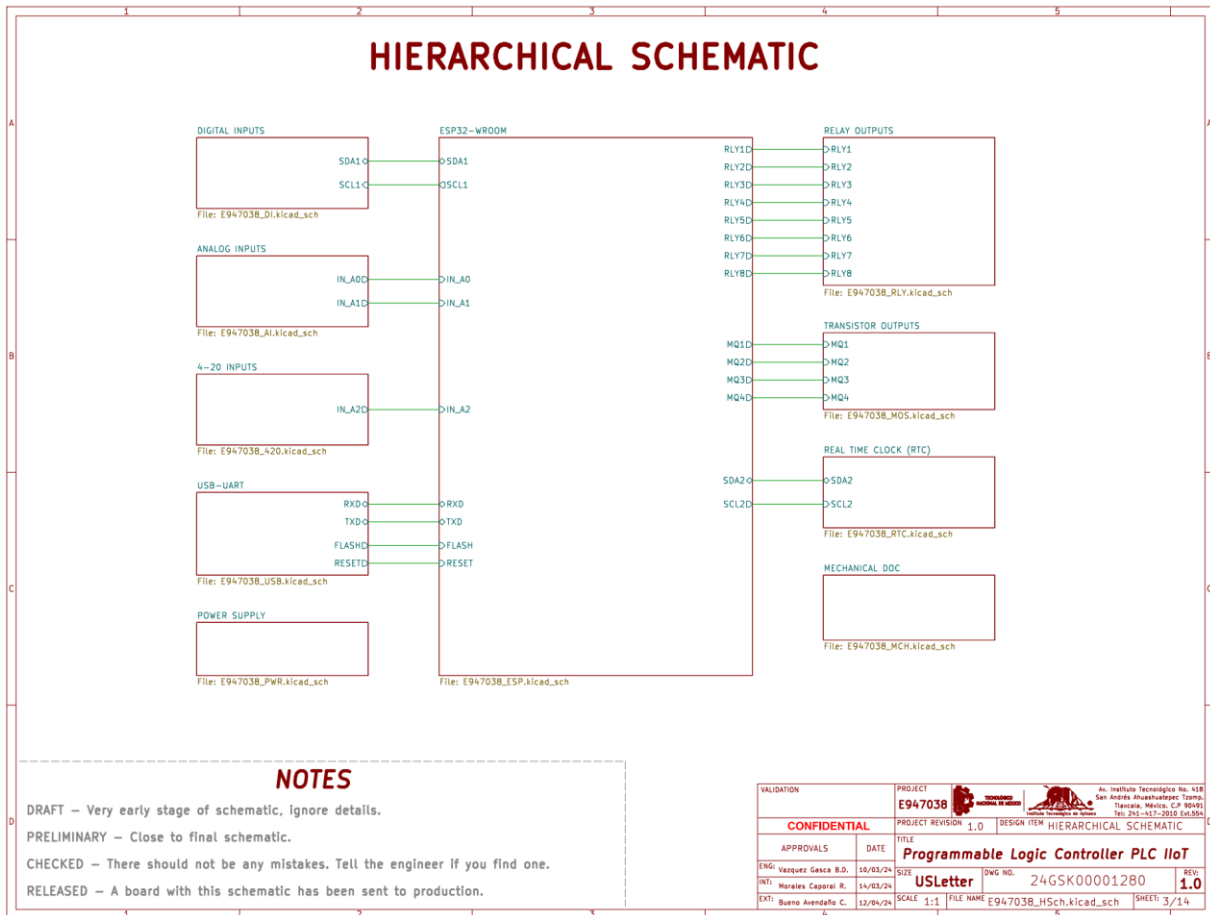


Figura 3.4.7: Hoja jerárquica del proyecto.

El uso de hojas jerárquicas simplifica y organiza el diseño de manera más profesional, en comparación con la alternativa de expandir una sola hoja para abarcar todo el proyecto. Esta estructura organizativa es especialmente útil para proyectos extensos como el que se está desarrollando, ya que permite una mejor gestión del diseño y una comprensión más clara de su estructura y funcionalidad.

- **Portada del Proyecto**

Esta portada resulta fundamental para los usuarios que revisan el esquema, brindándoles una referencia rápida y útil. Es estándar en la práctica profesional incluir una portada con al menos el nombre del proyecto y una lista de páginas y además una vista 3D de la placa diseñada, que incluya los números de página correspondientes.

Es común que los ingenieros involucrados en un proyecto consulten la portada al abrir el esquema, para localizar rápidamente la información que necesitan, como, por ejemplo, el número de página relacionado con Reloj en Tiempo Real, y saltar directamente a esa sección. La ausencia de una portada puede llevar a una búsqueda prolongada en cada página del esquema en busca de información específica. Además, la portada resulta extremadamente útil al imprimir el esquema y no contar con herramientas de búsqueda disponibles. La portada realizada se muestra en la figura 3.4.8 que incluye el bloque de título, índice, imagen de placa desarrollada 3D, estado del proyecto, notas de diseño, y título general.

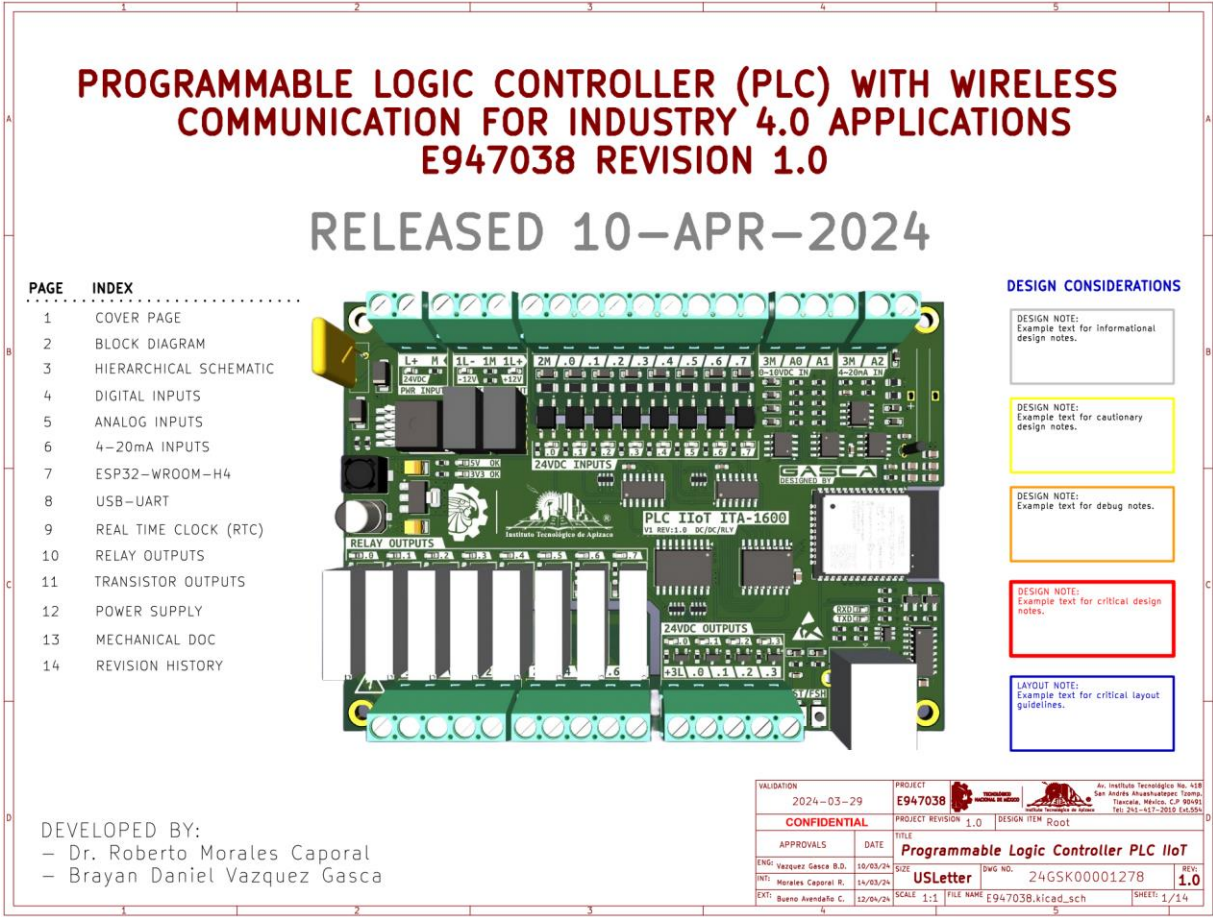


Figura 3.4.8: Pagina de portada del proyecto.

Además, es importante mencionar que redactar toda la documentación en inglés facilita la comprensión y colaboración en entornos profesionales internacionales, donde el inglés suele ser el idioma común de comunicación. Además, al redactar en inglés, se garantiza que la información sea accesible para un público más amplio y se alinea con las prácticas estándar de la industria, lo que mejora la profesionalidad y la calidad del trabajo técnico.

- **Diagrama de Bloques**

La inclusión de un diagrama de bloques resulta sumamente útil para quienes consultan el esquema. Simplemente al observar el diagrama de bloques, es posible obtener una comprensión clara de la naturaleza del esquema y de todos los elementos que lo componen (como chips, conectores y sus interconexiones). Esta práctica marca la diferencia entre un esquema aficionado y uno profesional, considerándose estándar que todos los esquemas profesionales incluyan una página dedicada al diagrama de bloques. Se ha observado que numerosos esquemas sin diagrama de bloques dificultan considerablemente la comprensión de su funcionamiento. La figura 3.4.9 muestra el diagrama de bloques dibujado.

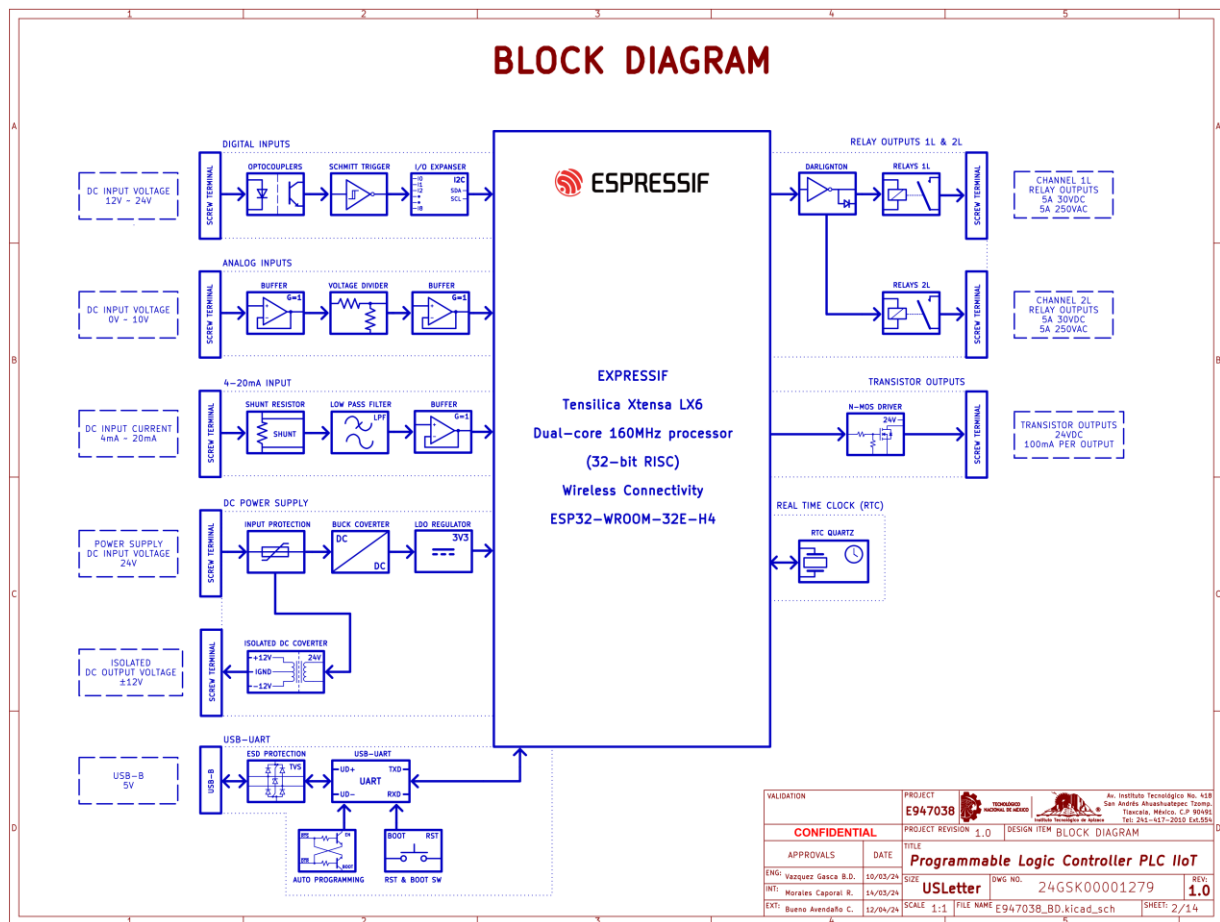


Figura 3.4.9: Pagina de diagrama de bloques.

El ANEXO C muestra el diagrama esquemático completo donde con base al diseño de componentes y con la selección de componentes se realizó el diseño detallado, donde se muestra la totalidad de entradas y salidas que contempla el diseño final.

3.4.3 Diseño de Placa de Circuito Impreso

En esta sección, se aborda el proceso de diseño de la PCB (Placa de Circuito Impreso) para el sistema en cuestión. La PCB desempeña un papel fundamental en la implementación física de los circuitos electrónicos, proporcionando la plataforma sobre la cual se montan y conectan los componentes electrónicos. A lo largo de este apartado, se mostrará parte del proceso de diseño de la PCB, desde la planificación inicial hasta la generación de vista tridimensional 3D la PCBA (Placa de Circuito Impreso Ensamblada) para la fabricación, tomando en cuenta las consideraciones de enrutamiento de señales, la disposición de los componentes.

- **Disposición de Componentes**

La disposición de componentes en una PCB es un paso crítico en el proceso de diseño, ya que afecta significativamente la funcionalidad y la fiabilidad del sistema electrónico. En esta sección, se aborda de manera preliminar organizar y colocar los componentes eléctricos y electrónicos en la placa de circuito impreso.

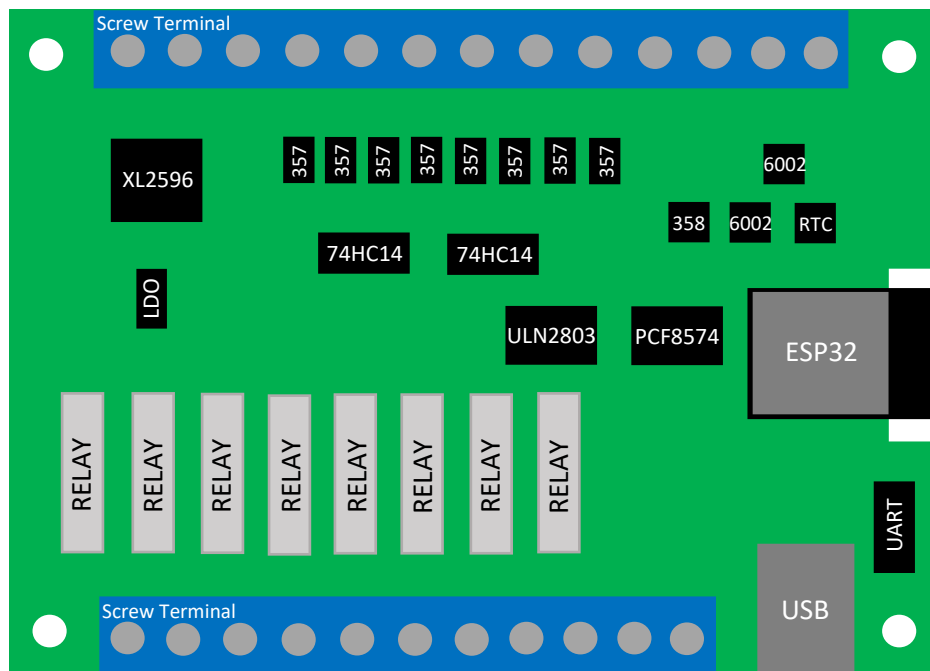
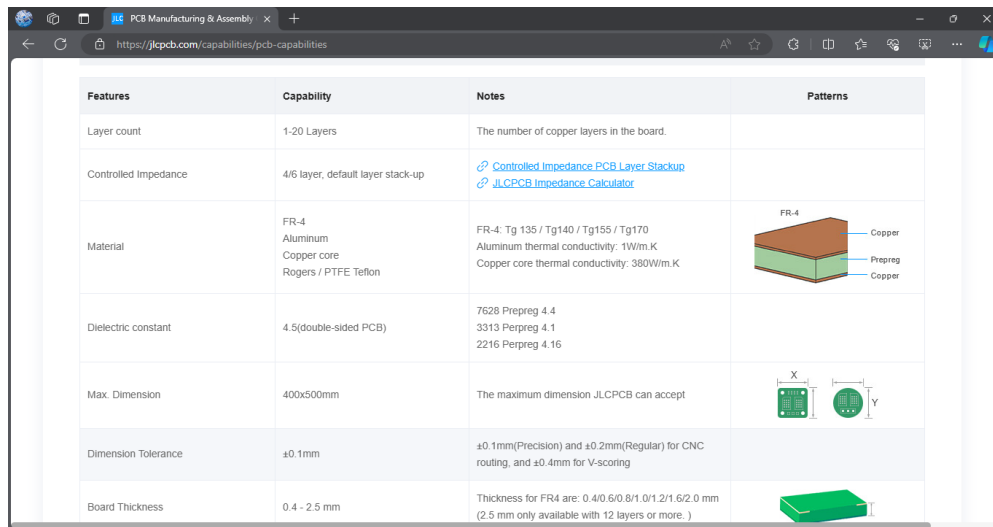


Figura 3.4.10: Disposición preliminar de componentes electrónicos en PCB.

La figura 3.4.10 muestra la disposición preliminar de cómo se planeó colocar los componentes electrónicos más críticos en la PCB tomando en cuenta las medidas del gabinete donde se resguardará la PCBA.

- **Reglas de Diseño**

Antes de proceder en el diseño de la PCB, es fundamental considerar las capacidades de fabricación del proveedor con el que se elaborará la PCB final. En este sentido, el fabricante JLCPCB proporciona una página donde detalla sus capacidades, como: separación mínima entre pistas, tamaño mínimo de serigrafía, ancho mínimo de pista, tolerancias de fabricación, entre otros aspectos relevantes (JLCPCB, 2024).



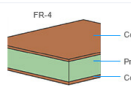
Features	Capability	Notes	Patterns
Layer count	1-20 Layers	The number of copper layers in the board.	
Controlled Impedance	4/6 layer, default layer stack-up	Controlled Impedance PCB Layer Stackup JLCPCB Impedance Calculator	
Material	FR-4 Aluminum Copper core Rogers / PTFE Teflon	FR-4: Tg 135 / Tg140 / Tg155 / Tg170 Aluminum thermal conductivity: 1W/m.K Copper core thermal conductivity: 380W/m.K	
Dielectric constant	4.5(double-sided PCB)	7628 Prepreg 4.4 3313 Prepreg 4.1 2216 Prepreg 4.16	
Max. Dimension	400x500mm	The maximum dimension JLCPCB can accept	
Dimension Tolerance	±0.1mm	±0.1mm(Precision) and ±0.2mm(Regular) for CNC routing, and ±0.4mm for V-scoring	
Board Thickness	0.4 - 2.5 mm	Thickness for FR4 are: 0.4/0.6/0.8/1.0/1.2/1.6/2.0 mm (2.5 mm only available with 12 layers or more.)	

Figura 3.4.11: Página web de JLCPCB de capacidades de fabricación y ensamblaje de PCB.

Las capacidades de diseño mencionadas deben incorporarse en la configuración de la placa. Se incluyen en el apartado de restricciones, para que el programa KiCad pueda alertar si alguna regla se ha infringido durante el diseño, lo que se reflejará en el DRC (Comprobador de reglas de diseño). En la figura 3.4.12 se muestra las capacidades de diseño del fabricante ingresados en los parámetros de restricciones de la PCB.

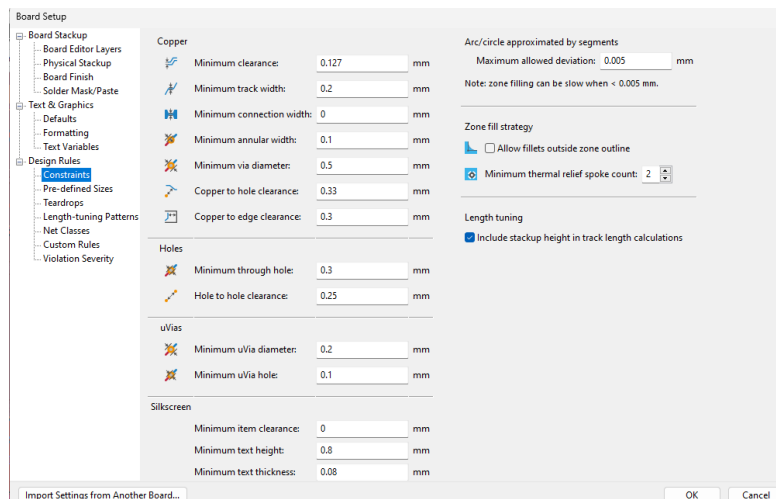


Figura 3.4.12: Ventana de configuración de la placa en KiCad.

- **Diseño en Editor de PCB**

En el software KiCad, se utiliza el PCB Editor para llevar a cabo el diseño de la PCB. Este proceso se inicia a partir de los diagramas esquemáticos y la disposición preliminar de los componentes previamente realizado. A continuación, se presentan capturas de pantalla tomadas durante las diferentes etapas del diseño de la PCB.

La Figura 3.4.13 presenta las dimensiones reales del gabinete, utilizadas como referencia para trazar las dimensiones finales de la PCB. Por otro lado, la Figura 3.4.14 muestra las huellas de los componentes electrónicos previamente seleccionados, en el área de trabajo.

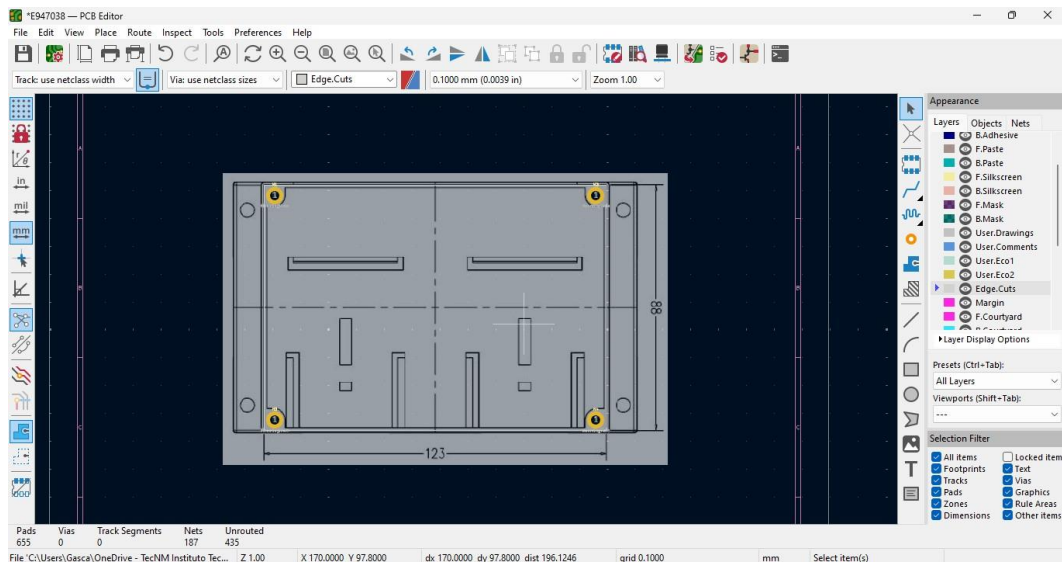


Figura 3.4.13 Trazado de tamaño de PCB con base a dimensiones reales del gabinete.

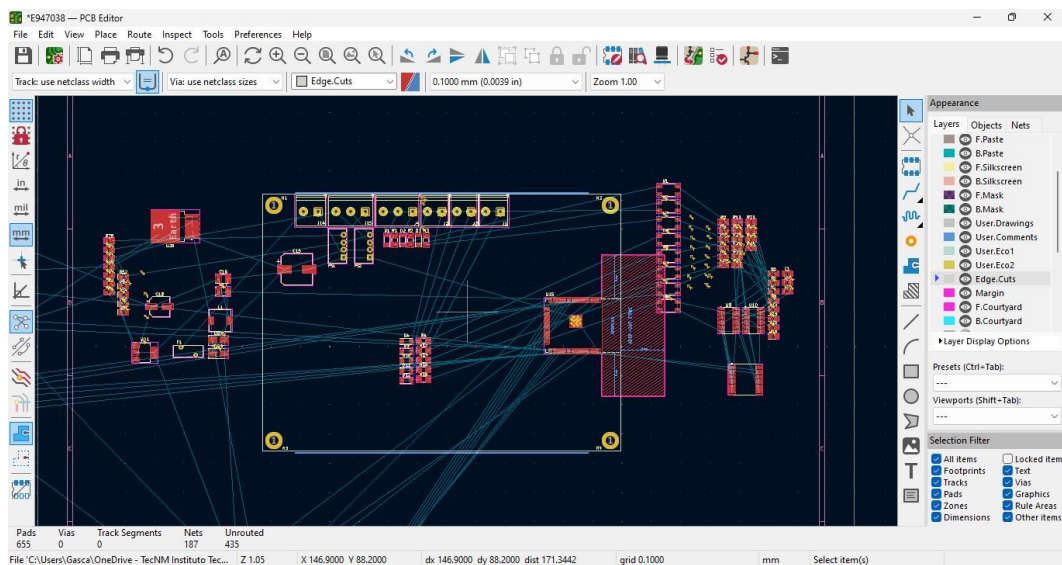


Figura 3.4.14: Huellas de componentes electrónicos en el área de trabajo PCB.

Conforme a la disposición preliminar realiza previamente en la figura 3.4.10, se realizó el acomodo de los componentes electrónicos y trazado de pistas, como se aprecia en la figura 3.4.15 y 3.4.16.

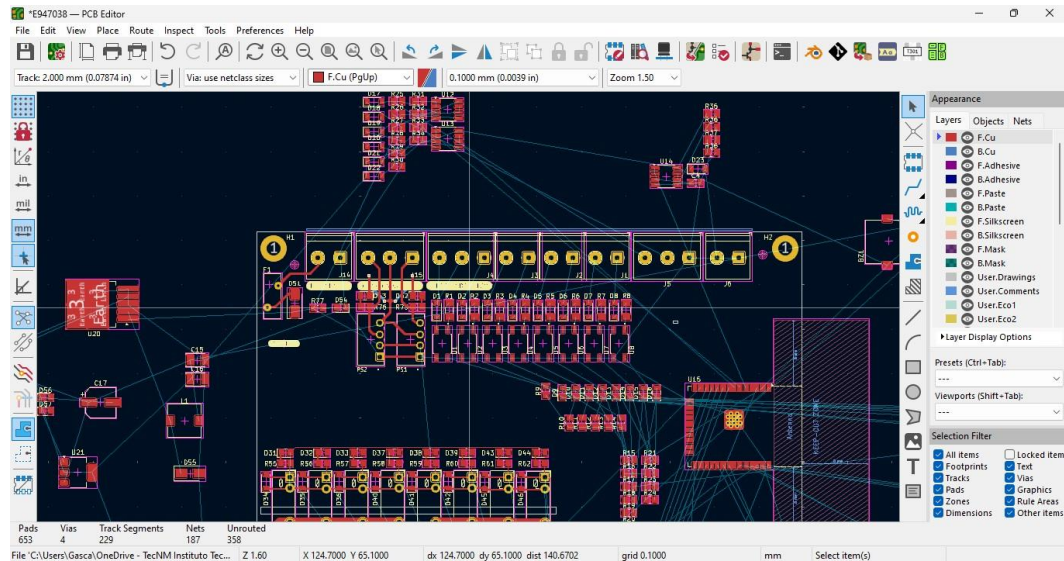


Figura 3.4.15: Acomodo y trazado de pistas en PCB.

El ancho de las pistas que manejaran alta corriente se calculó con base a la calculadora de ancho de pista que ofrece el software KiCad, dicho calculo se realiza con base a la norma IPC-2221. Para las pistas que manejan corriente de hasta 5 A para las salidas a relevador se obtuvo un ancho de pista de 2.7 mm, con pista en cada lado de la PCB como la figura 3.4.16.

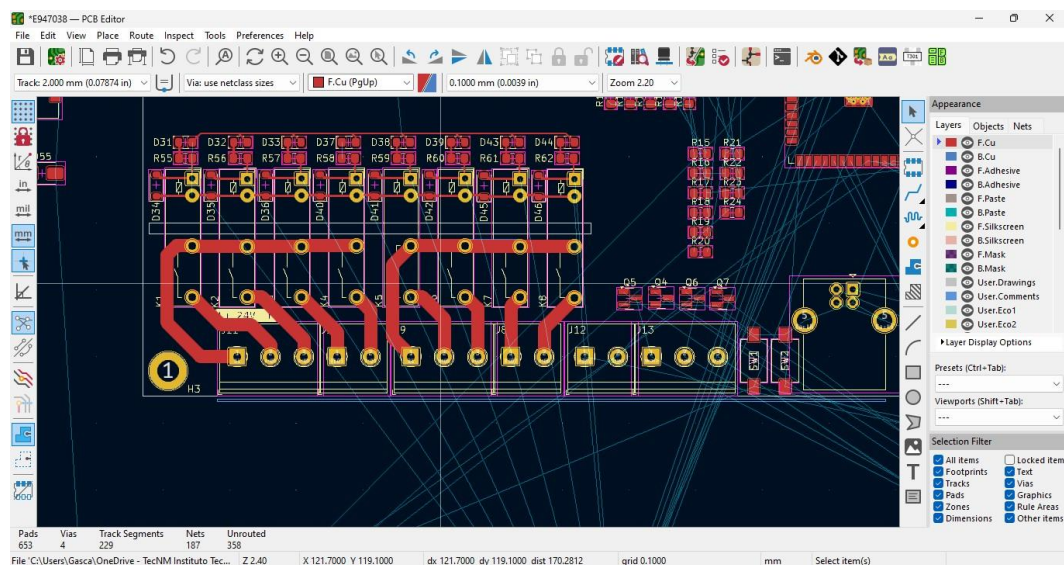


Figura 3.4.16: Ancho de pistas para relevadores.

La figura 3.4.17 muestra el ruteo realizado de las entradas digitales y salidas a relevador, donde la disposición se realizó acorde a lo planeado y se incluyó la serigrafía de identificación para cada salida de los terminales de tornillo, además de identificar cala LED indicador.

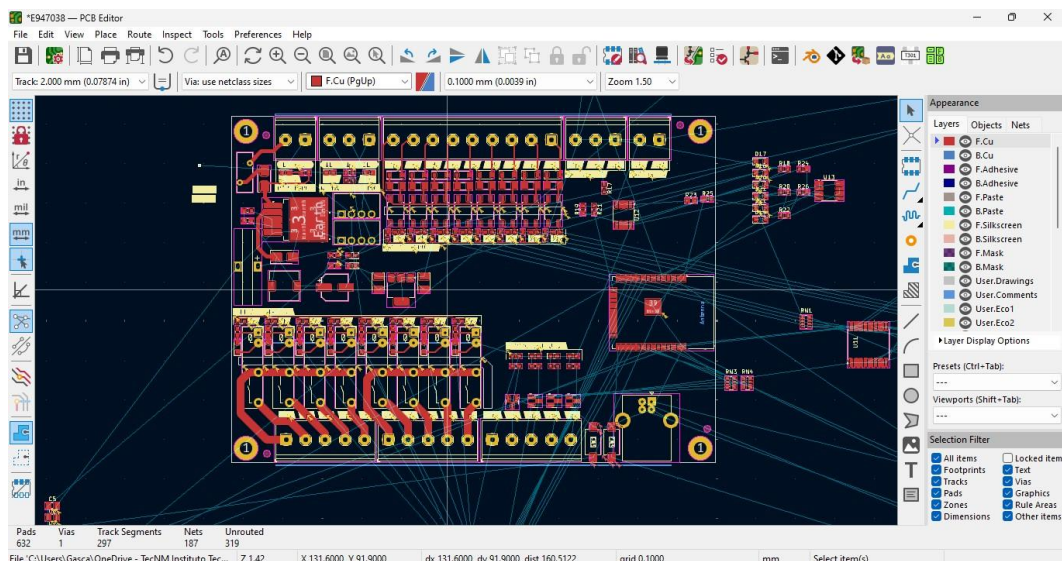


Figura 3.4.17: Ruteo de entradas digitales y salidas a relevador en la PCB.

En la PCB, además de la serigrafía para indicar los números de salidas y entradas, es importante agregar logotipos institucionales donde fue desarrollado el proyecto. Utilizando la herramienta de conversión de imagen a bitmap que ofrece el software, como se muestra en la figura 3.4.18, se pueden agregar directamente a la PCB los logotipos.



Figura 3.4.18: Conversión de imagen a bitmap.

En el diseño de la PCB del PLC se manejan componentes que operan con voltajes y corrientes elevadas. Esto presenta el riesgo de arcos eléctricos no deseados, lo que puede comprometer tanto la seguridad como el rendimiento del dispositivo. Para mitigar estos riesgos, es fundamental considerar la distancia de fuga (creepage) en la PCB. La distancia de fuga (creepage) en una PCB se refiere a la distancia a lo largo de la superficie aislante entre dos conductores, crucial para evitar arcos eléctricos y mejorar el rendimiento del circuito. Es vital para la seguridad eléctrica y el cumplimiento de normativa IPC-2221 utilizar métodos para aumentar la distancia de fuga, la figura 3.4.19 los muestra (Faheemuddin, 2024).

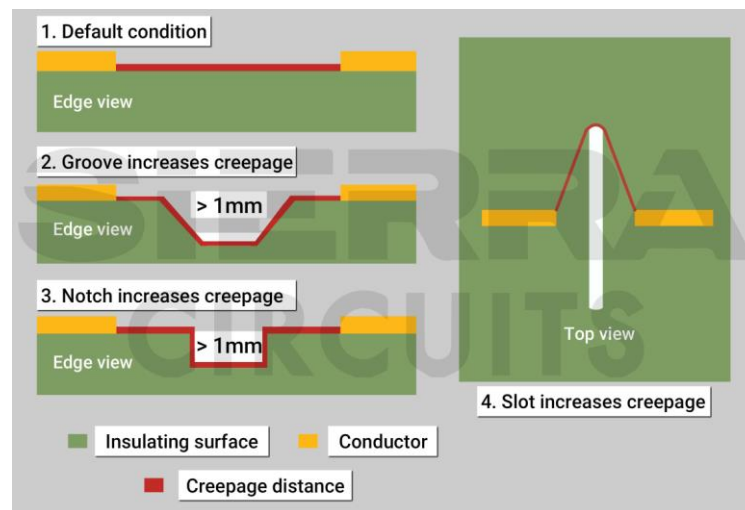


Figura 3.4.19: Ranuras y muescas ayudan a aumentar distancia de fuga en la PCB.

1. Situación por defecto: En este método, la distancia de fuga se mide a lo largo de la superficie de la PCB entre dos conductores. Se puede aumentar la distancia de fuga incrementando la distancia entre las pistas.

2. Método de ranura en V: En este escenario, la ranura en V incrementa la distancia superficial entre los conductores. La longitud superficial aumentada se mide hasta la ranura, alcanzando al menos 1 mm o más.

3. Enfoque de muesca de lados paralelos: Este método incrementa aún más la distancia superficial, pero debe tener al menos 1 mm o más de ancho.

4. Implementación de ranura: Una ranura con un ancho superior a 1 mm puede aumentar aún más la distancia de fuga. Este método es uno de los más fáciles y rentables. Sin embargo, tiene una limitación: requiere espacio libre, por lo que no puede aplicarse en todo momento.

En la parte de los relevadores es necesario separar la parte de los contactos y de la bobina, para lo cual se usará una ranura de aislamiento, para lo cual se seleccionó una distancia de aislamiento de 2 mm, separando los relevadores de la etapa de control, como se muestra en la figura 3.4.20.

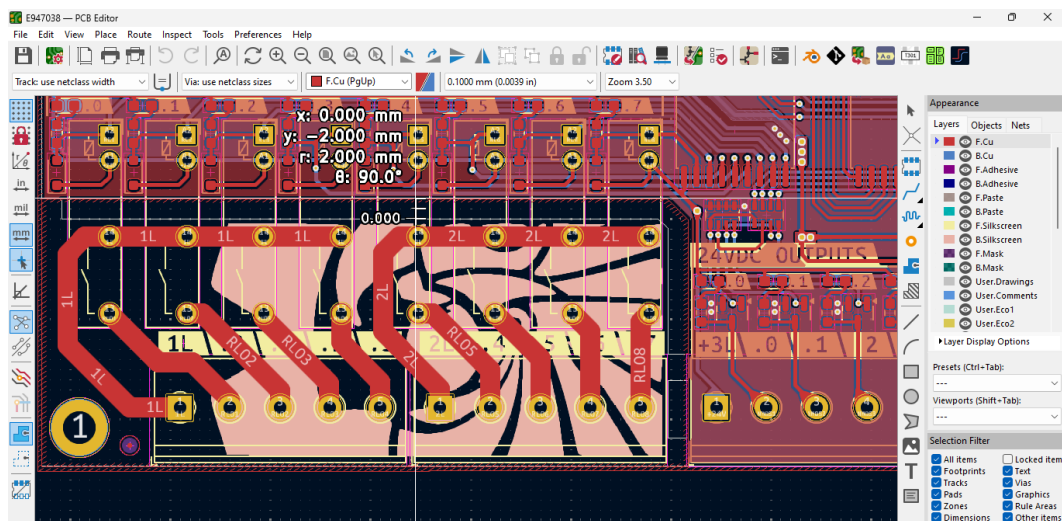


Figura 3.4.20: Ranura de aislamiento de 2 mm en área de relevadores.

Para el bloque de estradas digitales en la parte de los optoacopladores también se agregó una ranura de aislamiento de 2 mm, como se muestra en la figura 3.4.21. Esto es para separar entre la entrada y salida del optoacoplador, esto debido a que al tratarse de entradas puede llegarse a conectarse erróneamente la entrada a un voltaje superior causar un arco eléctrico.

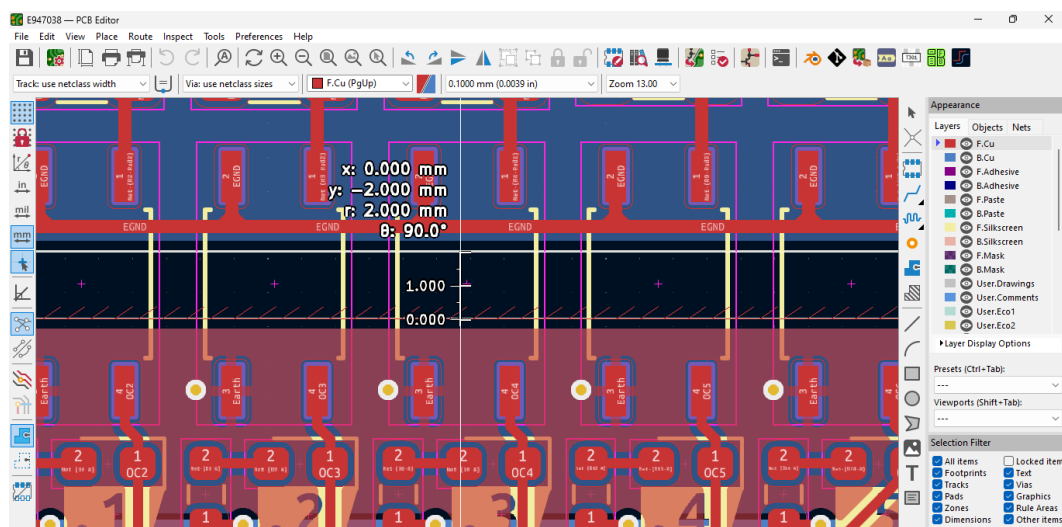


Figura 3.4.21: Ranura de aislamiento de 2 mm en área de optoacopladores.

En la figura 3.4.22 se muestra el diseño final de las pistas de la capa superior, señalizadas en color rojo. Como se puede apreciar, las pistas de la etapa de control son más delgadas en comparación con las pistas de potencia. Para cada pista, se ajustó el tamaño y la disposición de acuerdo con la corriente y el uso, siguiendo las normativas IPC-2221.

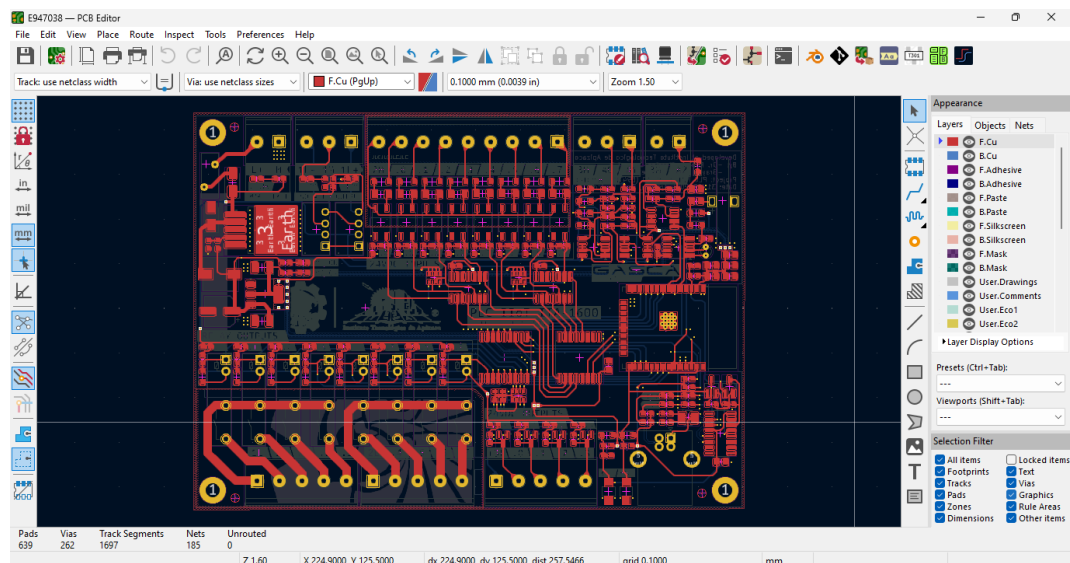


Figura 3.4.22: Ruteo final de PCB capa superior.

La figura 3.4.23 muestra la capa inferior de la PCB, donde se aprecian las pistas de color azul, estas ayudan a comunicar los distintos elementos mediante vías entre las dos capas.

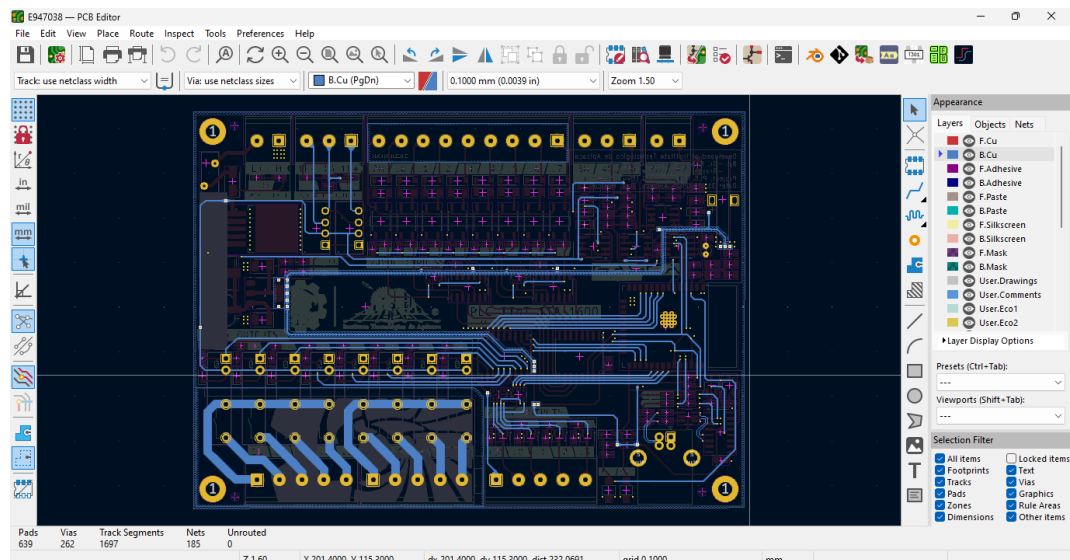


Figura 3.4.23: Ruteo final de PCB capa inferior.

Un plano de tierra es una gran área de cobre en una placa de circuito impreso que está conectada a tierra. Este plano actúa como un escudo, evitando que la interferencia electromagnética (EMI) afecte las señales en la PCB. No utilizar un plano de tierra puede provocar ruidos no deseados en la señal, lo que puede afectar al rendimiento del circuito (JLPCB, 2023).

En la figura 3.4.24 muestra las zonas de cobre conectada como plano de tierra, omitiendo colocar cobre en partes donde se manejan voltajes externos al PLC.

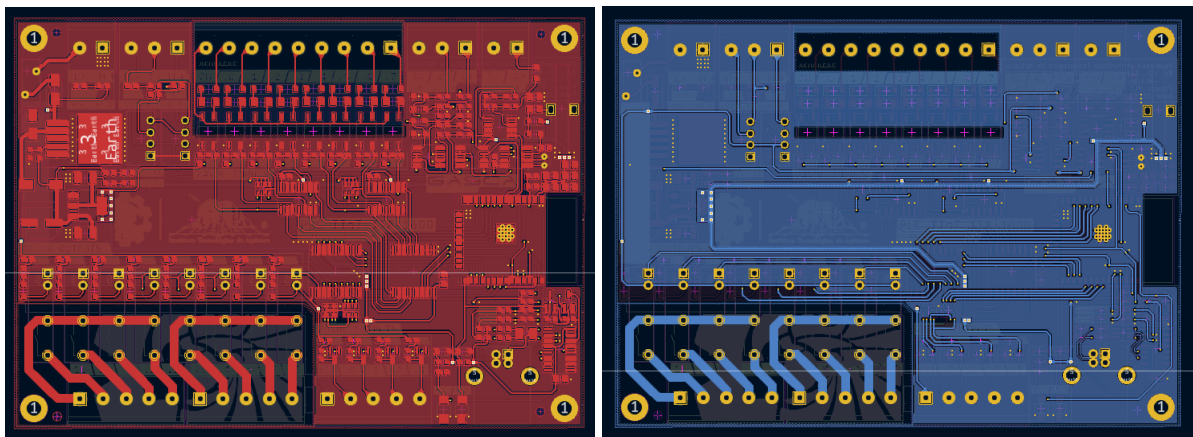


Figura 3.4.24: Plano de tierra en capa superior e inferior.

Para finalizar el proceso de diseño de la PCB, es fundamental verificar que todas las conexiones y disposiciones de componentes cumplan con los estándares y especificaciones requeridas. Una herramienta crucial para esta verificación es el DRC (Design Rule Check), una función de software que examina el diseño de la PCB en busca de errores potenciales, como objetos superpuestos y pines desconectados y verificación de reglas de diseño previamente establecidas (JLPCB, 2023).

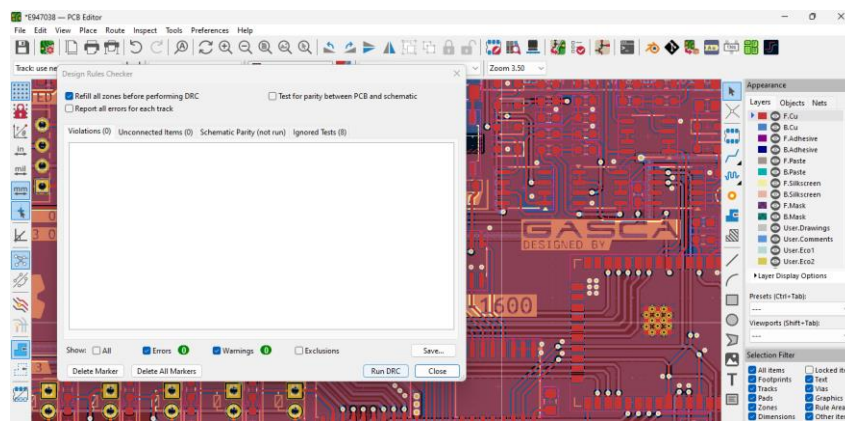


Figura 3.4.25: Ejecución del DRC en la PCB diseñada sin ningún error.

3.4.3 Representación 3D

En esta sección se presenta la representación tridimensional de la placa PCB diseñada, incluyendo todos los componentes electrónicos. Utilizando las herramientas avanzadas de KiCad, se ha generado una visualización en 3D que permite observar cómo se verá la placa final una vez ensamblada. Las siguientes figuras 3.4.26 y 3.4.27 muestran vistas delantera y trasera de la PCB en 3D, destacando la disposición de los componentes y la estructura final.

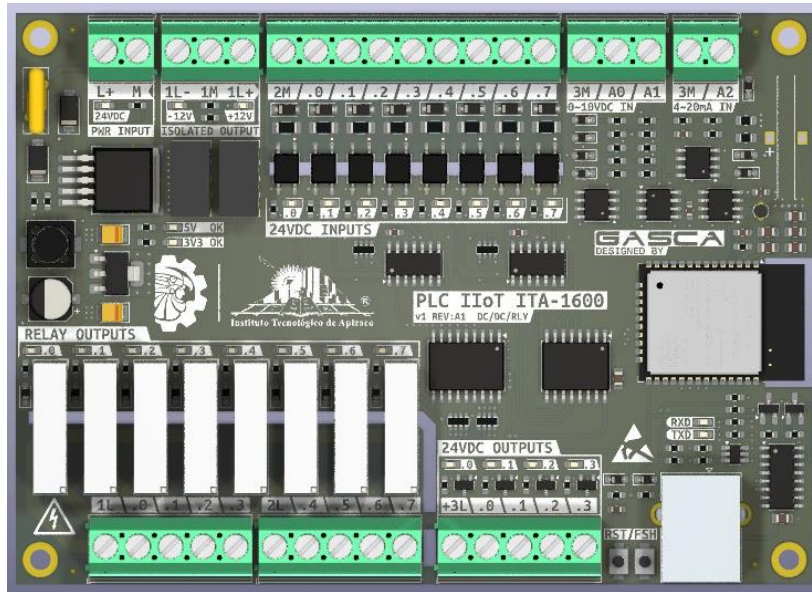


Figura 3.4.26: Vista delantera de la PCB en 3D.

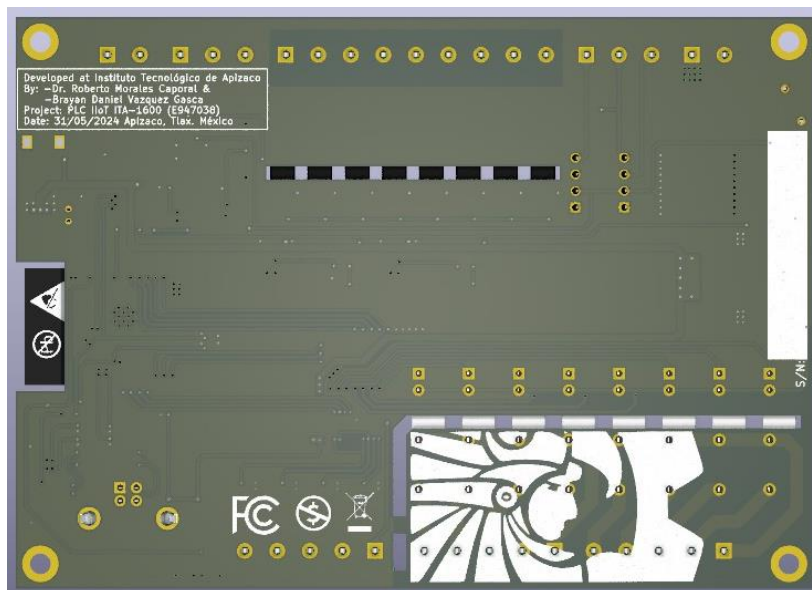


Figura 3.4.27: Vista trasera de la PCB en 3D.

3.5 Implementación

En esta sección se detalla el proceso de implementación del proyecto, que incluye la construcción y ensamblaje de un prototipo. La implementación abarca varias etapas críticas, desde la creación de archivos de fabricación de las placas de circuito impreso (PCB) hasta la inspección visual de PCBA de acuerdo con normas IPC.

- **Creación de archivos de fabricación**

Dentro del software KiCad ofrece una herramienta para crear los archivos necesarios para la fabricación de la PCB, como se aprecia en la figura 3.5.1, incluyendo los archivos Gerber, la lista de materiales (BOM), y los archivos de taladrado.

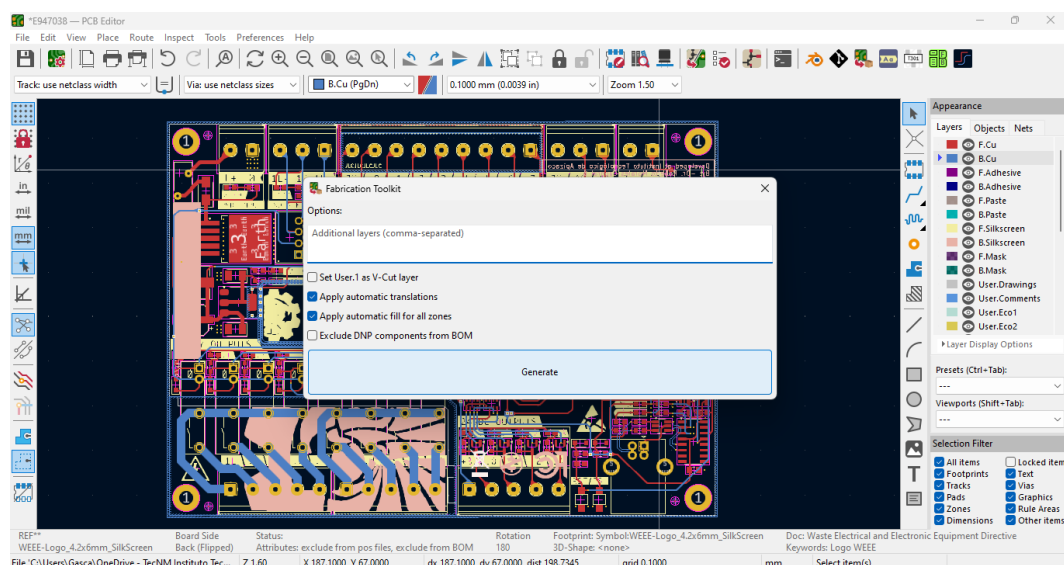


Figura 3.5.1: Generación de archivos de fabricación de PCB.

- **Fabricación de PCB**

La elección del fabricante adecuado para la producción de las PCB se tomó considerando factores como calidad, costo y tiempo de entrega. El fabricante JLCPCB fue seleccionado debido a su reconocido prestigio en la industria electrónica y su capacidad para cumplir con los requisitos necesarios. La figura 3.5.2 muestra la ventana donde se cargan los archivos de fabricación, se seleccionan los detalles como color, tamaño, etc. y se procede al pago.

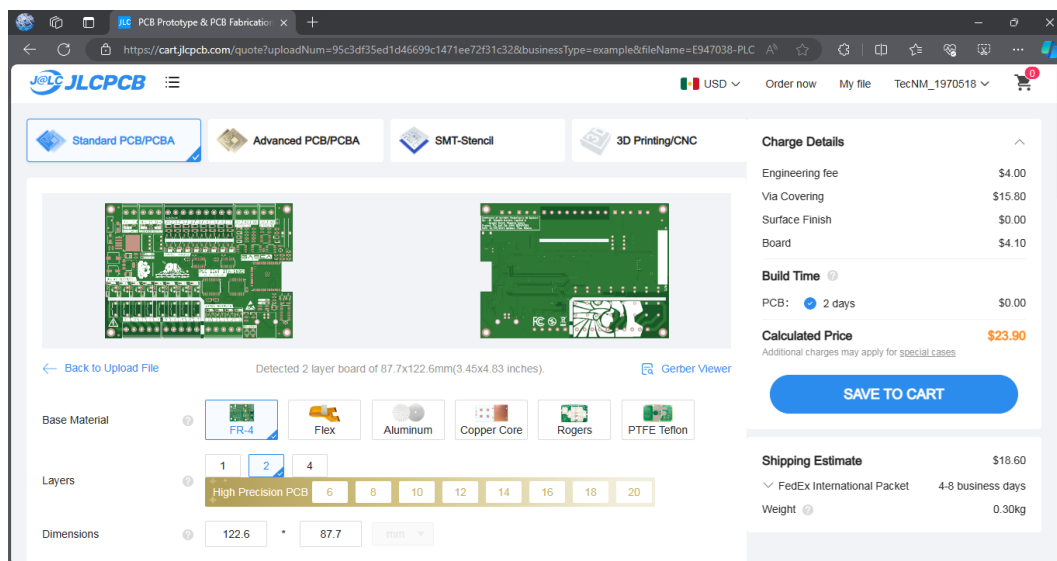


Figura 3.5.2: Pagina web del fabricante para ordenar la PCB.

La figura 3.5.3 muestra los detalles de fabricación de la PCB, destacando su composición con material FR4 de doble capa y su calidad conforme a la normativa IPC Clase 2.

Product Detail				✕	
Gerber file:	E947038-PLC_Y1	Build Time:	2 days		
Base Material:	FR-4	Layers:	2		
Dimension:	122.6 mm* 87.7 mm	PCB Qty:	5		
Product Type:	Industrial/Consumer electronics	Different Design:	1		
Delivery Format:	Single PCB	PCB Thickness:	1.6		
Impedance Control:	no	Layer Sequence:			
PCB Color:	Green	Silkscreen:	White		
Material Type:	FR4-Standard TG 135-140	Via Covering:	Tented		
Surface Finish:	HASL(with lead)	Deburring/Edge rounding:	No		
Outer Copper Weight:	1 oz	Gold Fingers:	No		
Flying Probe Test:	Fully Test	Castellated Holes:	no		
Edge Plating:	No	Remove Order Number:	Specify a location		
4-Wire Kelvin Test:	No	Paper between PCBs:	No		
Appearance Quality:	IPC Class 2 Standard	Confirm Production file:	No		
Silkscreen Technology:	Ink-jet/Screen Printing Silkscreen	Package Box:	With JLCPCB logo		
Board Outline Tolerance:	±0.2mm(Regular)				

Figura 3.5.3: Detalles de fabricación de la PCB.

- **Inspección de PCB**

Después de realizar el pedido y recibir el paquete por parte de la paquetería se procedió a realizar una inspección inicial de calidad, siguiendo los estándares establecidos por la norma IPC-A-600, donde esta normativa proporciona directrices detalladas para la inspección visual de las placas de circuito impreso, garantizando su conformidad con los requisitos de calidad y las especificaciones necesarias.



Figura 3.5.4: PCB's recibidas en embalaje de protección sellado al vacío.

La figura 3.5.5 muestra las PCB's recibidas, las cuales presentan una calidad satisfactoria y no muestran ningún problema evidente en cuanto a su fabricación.

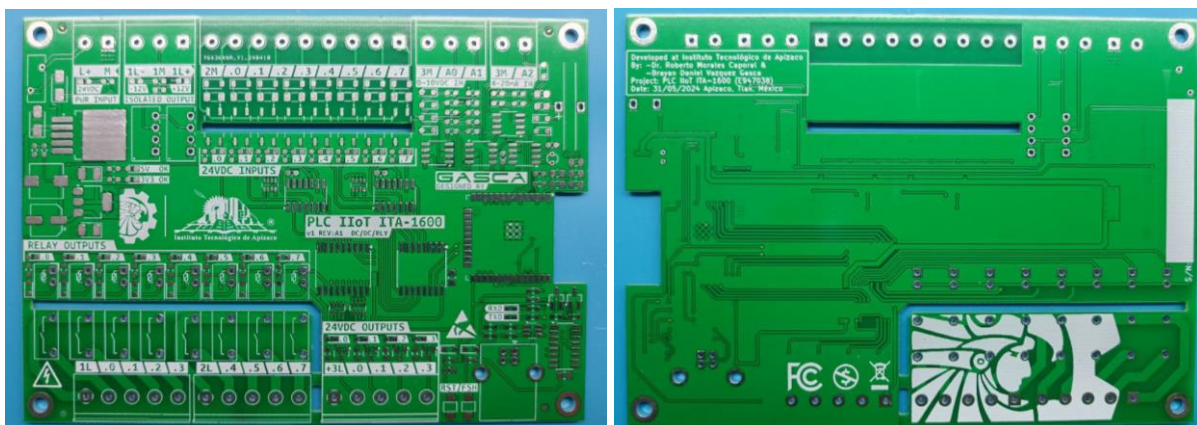


Figura 3.5.5: Vista delantera y trasera de las PCB's recibidas.

Con el fin de llevar a cabo una inspección más minuciosa de las PCB recibidas, se empleó un microscopio digital. Las figuras 3.5.6 a 3.5.15 muestran las fotografías del microscopio.



Figura 3.5.6: inspección entradas de 24V.



Figura 3.5.7: inspección de entradas 0~10V.

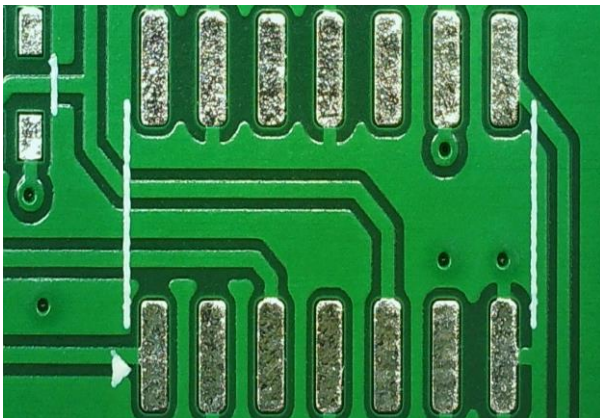


Figura 3.5.8: Inspección de vías

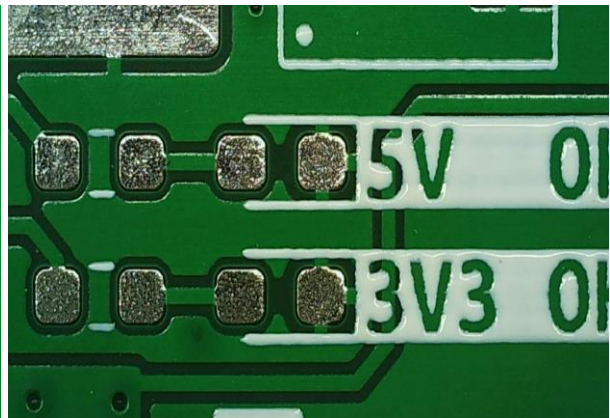


Figura 3.5.9: inspección de serigrafía y pads.

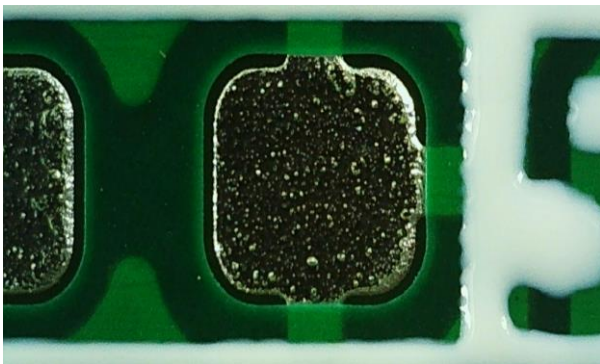


Figura 3.5.10: inspección de pads SMD.

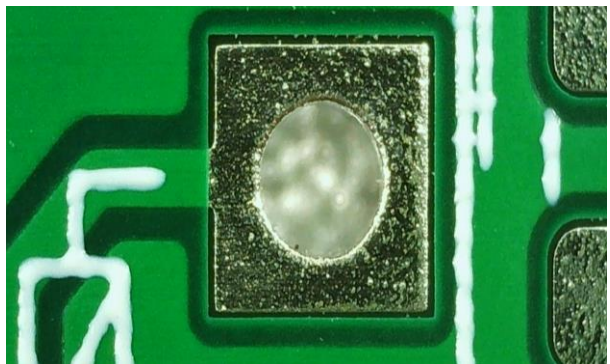


Figura 3.5.11: inspección de agujeros PTH.



Figura 3.5.12: Inspección de serigrafía.

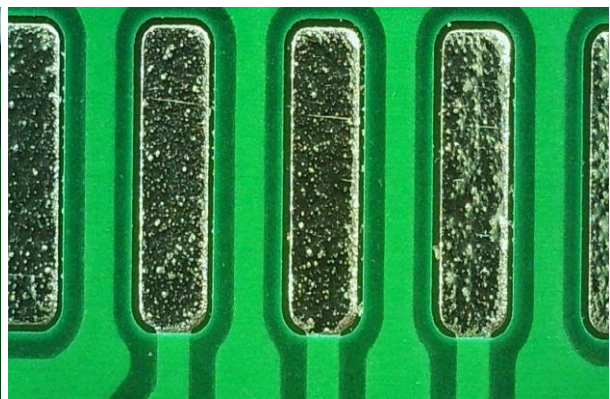


Figura 3.5.13: inspección de pads y pistas.

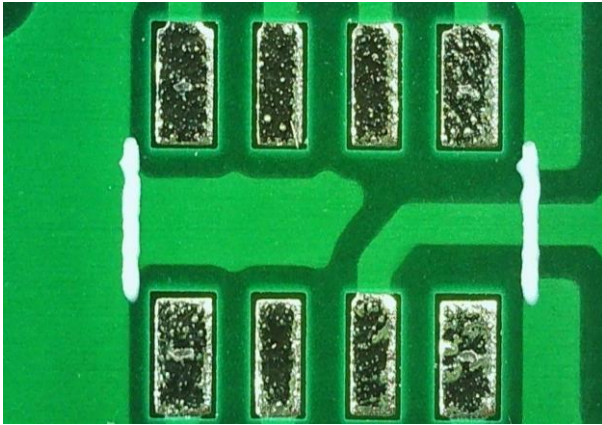


Figura 3.5.14: inspección de zonas de cobre.



Figura 3.5.15: inspección de terminales PTH.

Una vez examinada minuciosamente cada parte de la PCB con el microscopio, se concluyó que el diseño de la PCB cumple con los estándares de calidad de la Clase 2 de IPC. La inspección se realizó en concordancia con la normativa IPC-A-600, que establece pautas específicas para la evaluación visual de las placas de circuito impreso, asegurando su conformidad con los estándares de calidad y las especificaciones requeridas.

- **Ensamblaje de PCBA**

Tras la inspección visual de la PCB se procedió al ensamblaje. En la figura 3.5.16 se muestran los componentes eléctricos y electrónicos comprados a lo largo del diseño de bloque.



Figura 3.5.16: Componentes electrónicos para el ensamblaje de PCBA.

Se realizó una verificación de todos los componentes electrónicos para asegurarse de que coincidían con las especificaciones del diseño de bloques. Esto incluyó la comprobación de valores y empaquetados, así como la integridad de cada componente.

Para colocar los componentes electrónicos en la PCB, normalmente se utilizan los identificadores como R1, D1, U1, etc., impresos en la serigrafía de la PCB, y se sigue el diagrama esquemático. Sin embargo, dada la gran cantidad de componentes y el espacio limitado en el diseño de la PCB, se optó por no incluir estos identificadores en la serigrafía de la placa, manteniendo solo las marcas de polaridad y el primer pin de cada componente. Esto puede complicar la tarea de ubicar cada componente en la PCB.

Para facilitar este proceso, el software KiCad ofrece una herramienta llamada HTML BOM, que genera un archivo HTML con la lista de materiales y una vista 2D de la placa. Al seleccionar cada componente en esta herramienta, se resalta en rojo en la PCB, lo que simplifica significativamente la colocación de los componentes electrónicos. Esta herramienta no solo ahorra tiempo durante el ensamblaje, sino que también reduce el riesgo de errores que podrían surgir al colocar los componentes incorrectamente.

La figura 3.5.17 muestra la ventana del archivo HTML generado para el ensamblaje de la PCBA. En la parte izquierda, se presenta la lista de materiales (BOM), incluyendo el identificador (R1, D1, etc.), valor, huella y cantidad de cada componente. En la parte derecha, se muestra una vista 2D de la PCB, donde se resalta en rojo la ubicación de los componentes seleccionados. Esta visualización interactiva permite a los técnicos y ensambladores identificar rápidamente la posición de cada componente, mejorando así la eficiencia y precisión del proceso de ensamblaje.

	Source	Placed	References	Value	Footprint	Quantity
1	☐	☐	C2, C3, C4, C11, C14, C15	100n	C_0603_1608Metric_Pad1_08x0.95mm_HandSolder	6
2	☐	☐	C1, C8, C9, C10, C12	100n	C_0805_2012Metric_Pad1_18x1.45mm_HandSolder	5
3	☐	☐	C5, C6	10u	C_0805_2012Metric_Pad1_18x1.45mm_HandSolder	2
4	☐	☐	C16, C17	10u	CP_EIA-3528-21_Kemet-B_Pad1.50x2.35mm_HandSolder	2
5	☐	☐	C7	1u	C_0603_1608Metric_Pad1_08x0.95mm_HandSolder	1
6	☐	☐	C13	1F	C_Disc-SVS1F	1
7	☐	☐	C18	220u	CP_Elec_6.3x7.7	1
8	☐	☐	R45, R46, R47, R48, R49, R50, R51, R52, R53, R54, R55, R56, R59	15k	R_0603_1608Metric_Pad0_98x0.95mm_HandSolder	13
9	☐	☐	R17, R18, R27, R28, R32, R35, R39, R42, R43	10k	R_0603_1608Metric_Pad0_98x0.95mm_HandSolder	9
10	☐	☐	R1, R2, R3, R4, R9, R10, R11, R12	2k2	R_1206_3216Metric_Pad1_30x1.75mm_HandSolder	8

Figura 3.5.17: Herramienta HTML BOM para colocar componentes en PCB.

La figura 3.5.18 muestra el montaje parcial de los componentes electrónicos en la placa.

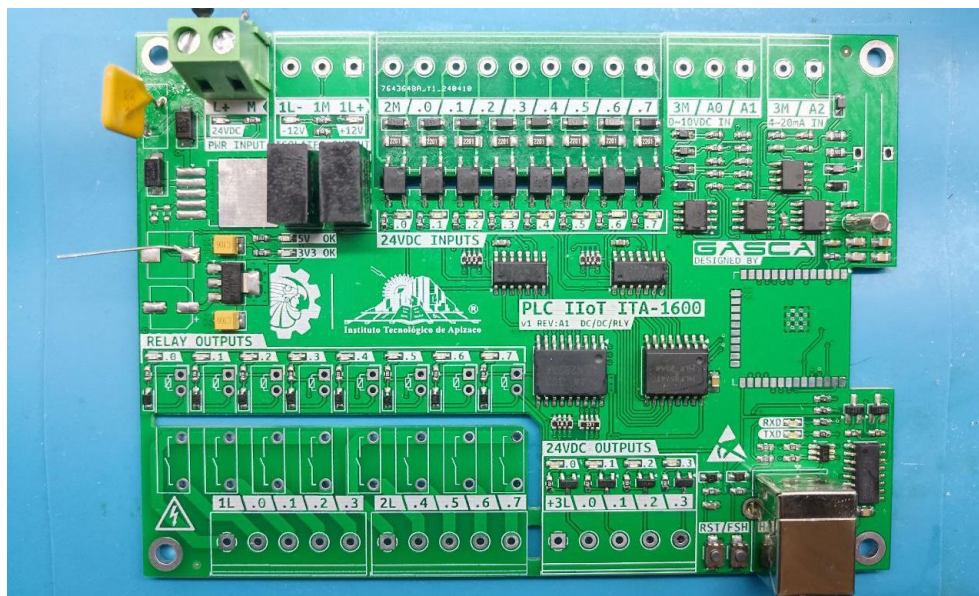


Figura 3.5.18: Colocación y soldadura de componentes en la PCB.

Posterior a la revisión eléctrica y comprobar que no existe ningún cortocircuito entre líneas de alimentación principales, se procedió a soldar los últimos componentes del PLC, como se muestra en la figura 3.5.19.

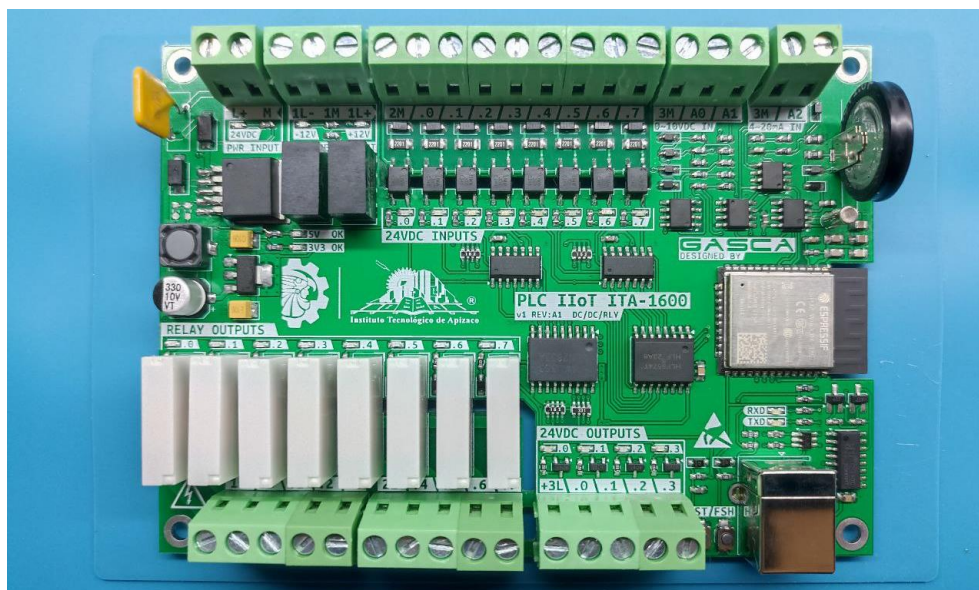


Figura 3.5.19: PCBA del PLC IIoT con todos los componentes soldados.

La figura 3.5.20 muestra que se ha completado el proceso de soldadura de todos los componentes eléctricos y electrónicos en la PCBA. En total, se han soldado 198 componentes

eléctricos/electrónicos a la placa. Cabe destacar que cada componente fue soldado a mano, lo cual es significativo debido a la cantidad y el tamaño de los componentes.

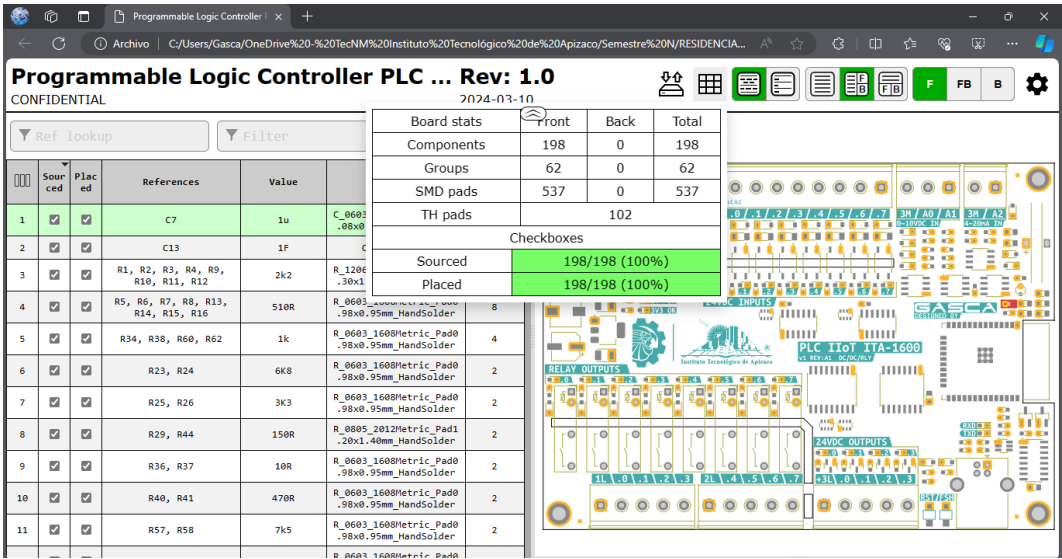


Figura 3.5.20: Lista completada de colocación de componentes en la PCBA.

- Inspección de PCBA

Después de completar el montaje de la PCBA, fue crucial realizar una inspección visual minuciosa de todas las soldaduras realizadas para garantizar la calidad y fiabilidad del producto final. Esta inspección se lleva a cabo para cumplir con los estándares establecidos por la normativa IPC-A-610, que define criterios de aceptación para las soldaduras en placas de circuito impreso. Es fundamental garantizar que todas las soldaduras estén libres de defectos, como puentes de soldadura, soldaduras frías o insuficientes. Las figuras 3.5.21 a 3.5.34 muestra las fotografías tomadas por el microscopio digital donde se aprecia los componentes SMD soldados en la PCBA del PLC IIoT.

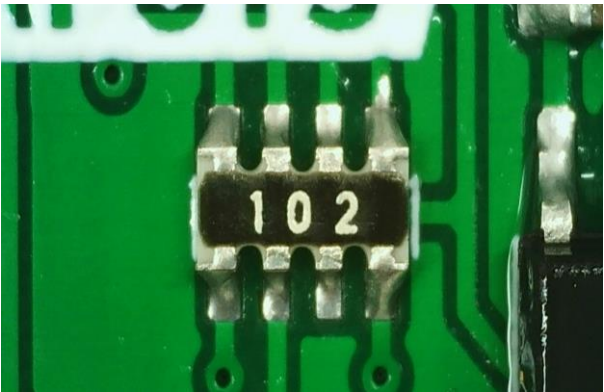


Figura 3.5.21: Resistor en red 0603 de pull-up.

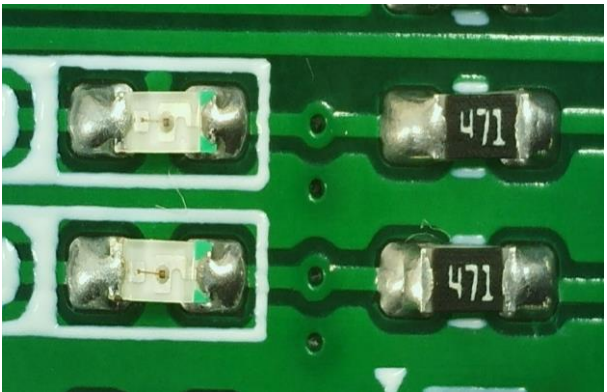


Figura 3.5.22: LED y resistores de TXD y RXD.

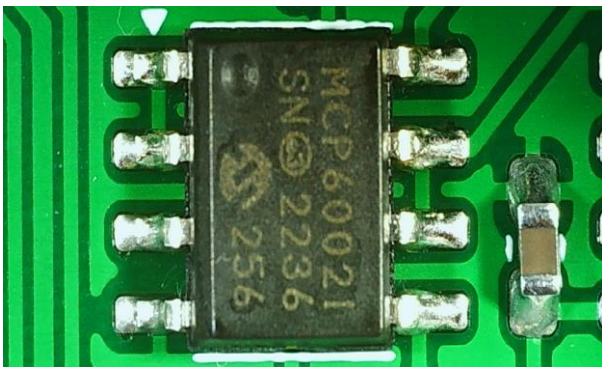


Figura 3.5.23: Amplificador operacional MCP6002.



Figura 3.5.24: Indicador LED de entrada digital.

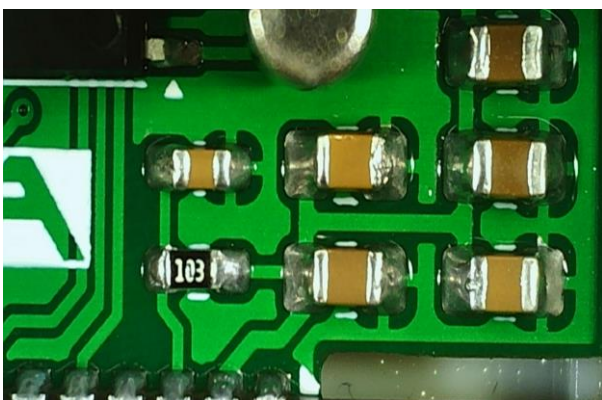


Figura 3.5.25: Capacitores de desacoplo.

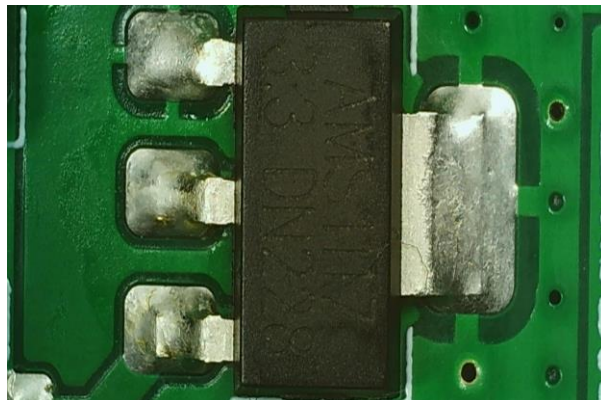


Figura 3.5.26: inspección de regulador lineal 3V3.

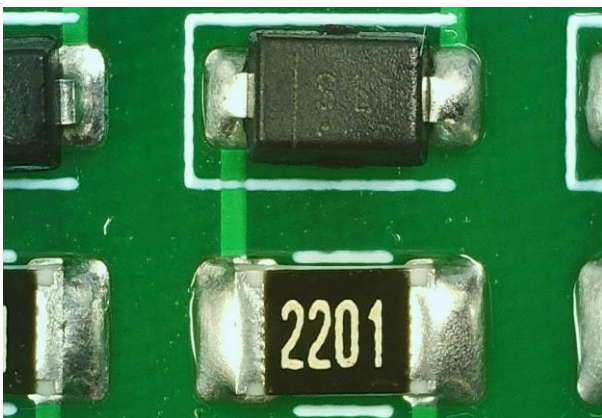


Figura 3.5.27: Protección de entrada 24 V.

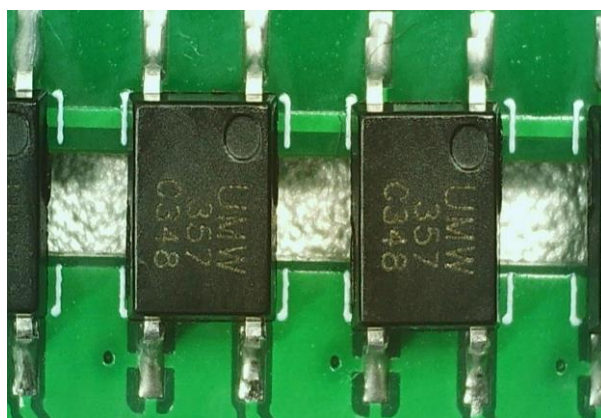


Figura 3.5.28: Optoacopladores de entrada.

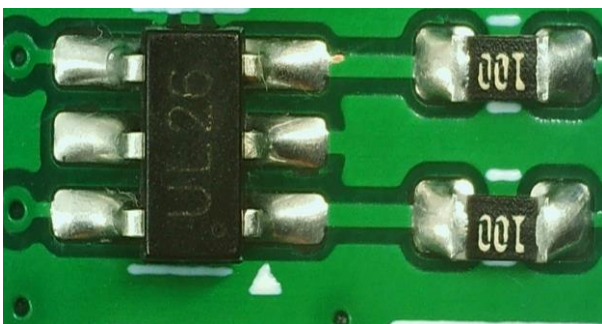


Figura 3.5.29: Protección ESD entrada USB.

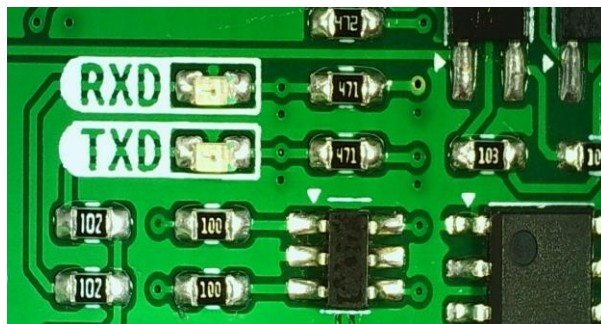


Figura 3.5.30: Conversor USB-UART CH340C.

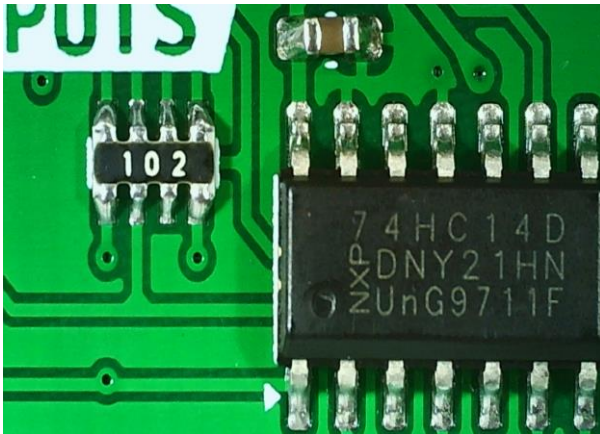


Figura 3.5.31: Compuerta NOT Schmitt Trigger.

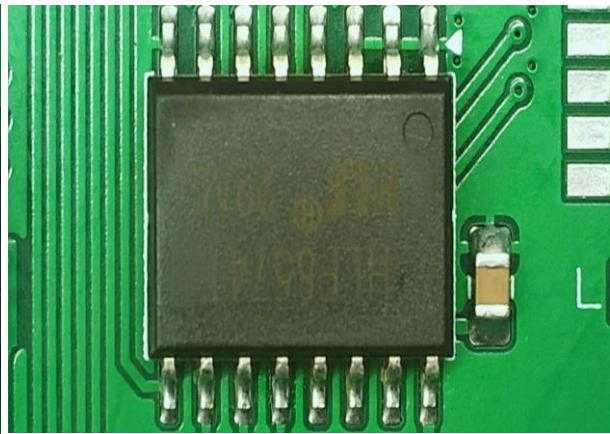


Figura 3.5.32: Expansor E/S PCG8574.

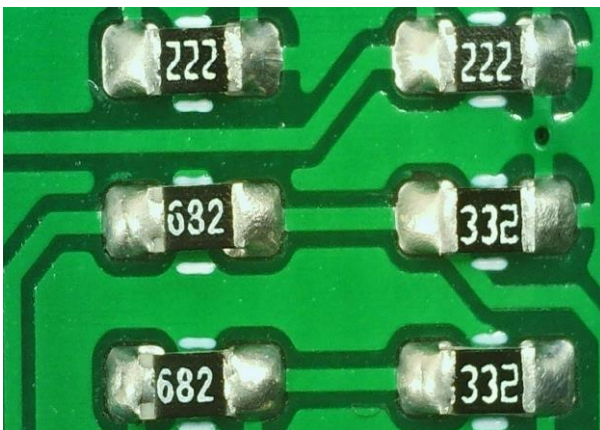


Figura 3.5.33: Resistores de entrada analógica.



Figura 3.5.34: Indicadores LED de salida simétrica.

Después de llevar a cabo una minuciosa inspección visual de la PCBA con la ayuda de un microscopio digital, se puede confirmar que el ensamblaje manual, realizado componente por componente, cumple con los estándares establecidos por la normativa IPC-A-610 en lo que respecta a los criterios de aceptabilidad para ensamblajes electrónicos. Esta evaluación garantiza la conformidad de cada soldadura y la integridad de todos los componentes, asegurando así la calidad y fiabilidad del prototipo final.

3.6 Etapa de Pruebas

La etapa de pruebas es crucial para asegurar que el Controlador Lógico Programable (PLC) IIoT desarrollado cumpla con los requisitos y especificaciones definidas en las fases de diseño y análisis. Siguiendo el modelo V, las pruebas se dividen en varias categorías para abordar diferentes aspectos del sistema, desde pruebas unitarias hasta pruebas de aceptación final. A continuación, se describen las diferentes fases de prueba llevadas a cabo.

3.6.1 Pruebas Unitarias

Las pruebas unitarias se centran en la evaluación de funcionalidades específicas de los circuitos y unidades de firmware del PLC. Cada bloque individual, como las entradas y salidas digitales y analógicas, y los módulos de comunicación inalámbrica, son probados de manera aislada.

- **Fuente de Alimentación:**

Para llevar a cabo las pruebas de la etapa de alimentación, se empleó un multímetro digital para medir los voltajes internos del PLC, que son de 5 V y 3.3 V. Estas mediciones son críticas para garantizar el funcionamiento adecuado de los circuitos y componentes electrónicos del dispositivo. La Figura 3.6.1 presenta los valores obtenidos durante las mediciones con el multímetro.

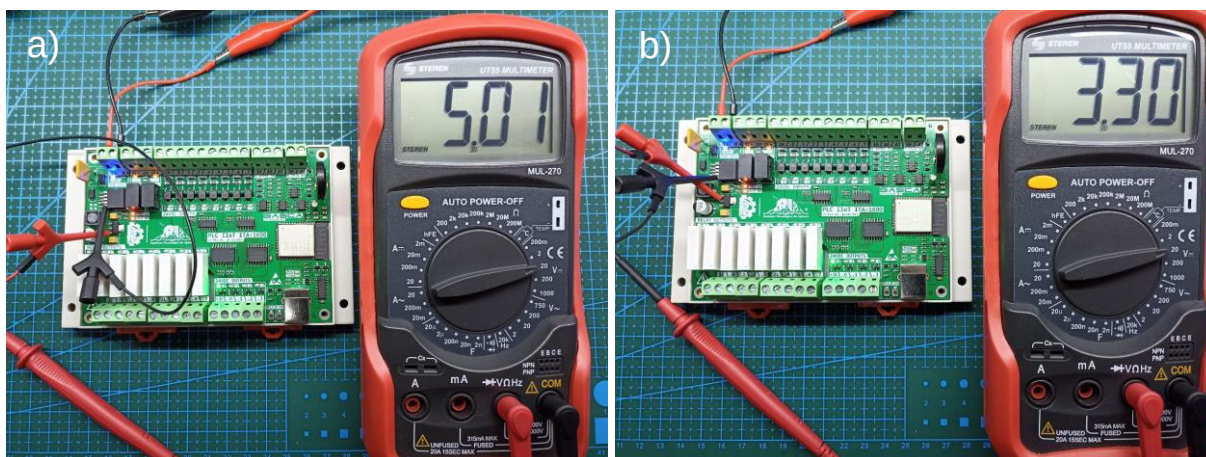


Figura 3.6.1: Pruebas de voltajes internos del PLC, (a) 5 V (b) 3.3 V.

De igual manera, se agregaron LED's que señalizan que los voltajes están presentes y funcionando correctamente en el PLC, de color rojo cada indicador de 5 V y 3.3 V.

La Figura 3.6.2 (a) muestra el voltaje medido a la entrada del PLC, el cual se mantiene constante a 24 VDC. Este voltaje es fundamental para el correcto funcionamiento del dispositivo y es suministrado desde una fuente de alimentación externa.

En la Figura 3.6.2 (b), se observan los LED indicadores que señalizan el funcionamiento del PLC. El LED de color azul se ilumina cuando el dispositivo está recibiendo la alimentación de 24 V en su entrada. Los dos LED amarillos indican que la salida simétrica del PLC está generando un voltaje simétrico de $\pm 12\text{V DC}$. Por otro lado, los LED rojos indican el correcto funcionamiento de los reguladores de voltaje de 5 V y 3.3 V.

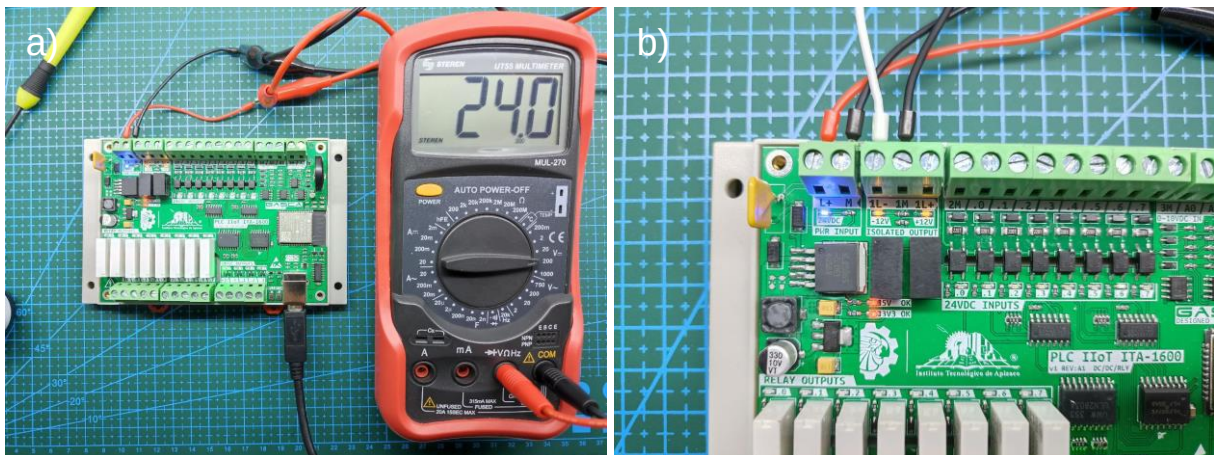


Figura 3.6.2: (a) Medición de voltaje externo de 24 V, (b) LED's indicadores de voltajes de la placa.

La figura 3.6.3 muestra los voltajes medidos con el multímetro digital a la salida de voltaje simétrico asilado de $\pm 12\text{ V}$.

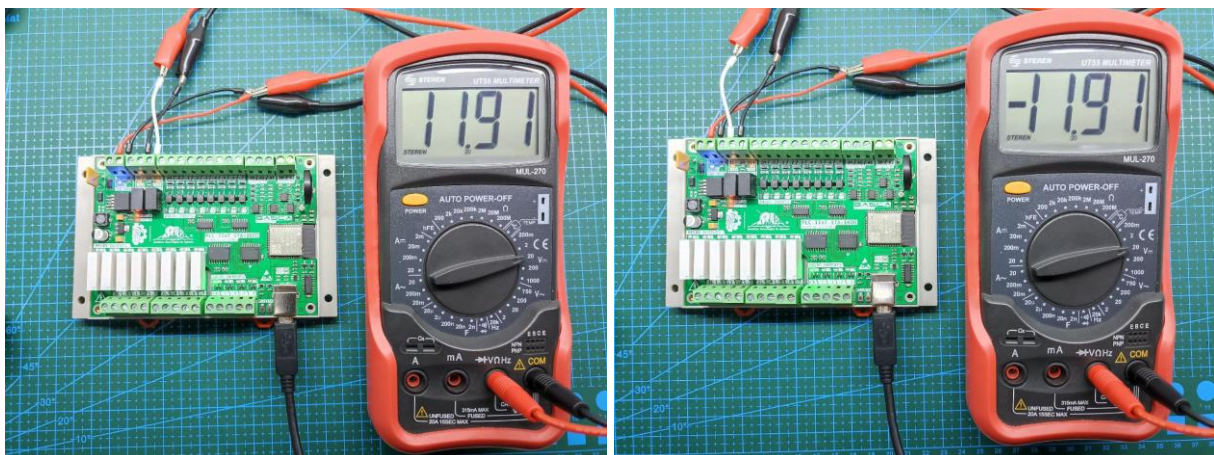


Figura 3.6.3: (a) Medición de voltaje positivo 12 V, (b) Medición de voltaje negativo -12 V

- **Comunicación USB-UART:**

Para realizar pruebas de que el bloque de conversión USB-UART se cargó un código de ejemplo al PLC, como se muestra en la figura 3.6.2.

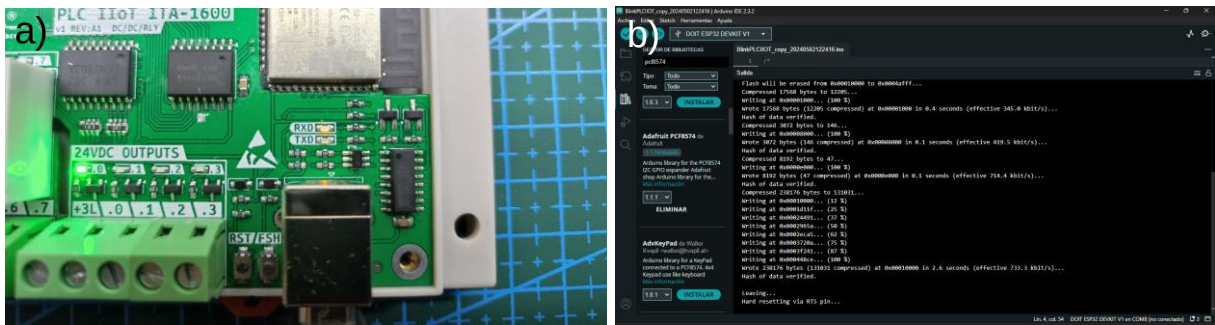


Figura 3.6.4: (a) indicadores LED de TXD y RXD, (b) Carga de firmware al PLC.

En la Figura 3.6.3 (a), se observa que los LED indicadores de TXD y RXD se iluminan durante el proceso de carga de firmware en el PLC. Estos indicadores son una confirmación visual del intercambio de datos entre el dispositivo y la computadora durante el proceso de carga. Por otro lado, la Figura 3.6.3 (b) muestra la salida que indica que el firmware ha sido cargado en su totalidad al PLC. Este resultado confirma que el proceso de carga ha finalizado correctamente y que el firmware está completamente operativo en el dispositivo.

- **Entradas Digitales:**

Para realizar las pruebas de las entradas digitales se utilizaron botones pulsadores, para probar cada pin de entrada funcione correctamente, como se aprecia en la figura 3.6.4.

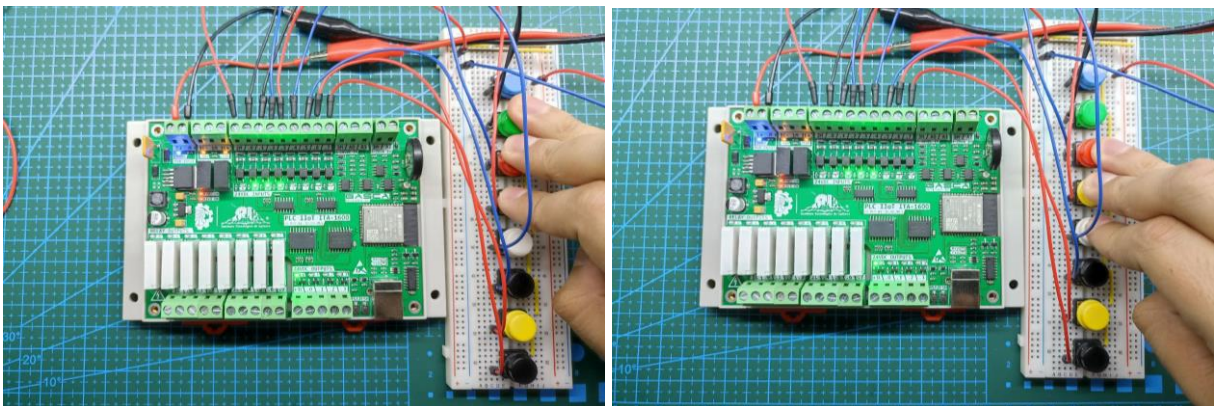


Figura 3.6.5: (a) Prueba 1 de entradas digitales, (b) Prueba 2 de entradas digitales.

- **Entradas analógicas 0V~10V:**

Para realizar las pruebas de las entradas analógicas de 0 V a 10 V se utilizó una fuente de alimentación variable, la cual su voltaje es medido con el multímetro digital en paralelo al voltaje de entrada.

La figura 3.6.5 (a) muestra el voltaje de prueba 1 medido de 2.81 V aplicado a la entrada analógica A0, la figura 3.6.5 (b) muestra el valor leído por el ESP32 después del acondicionamiento de la señal de 2.79 V.

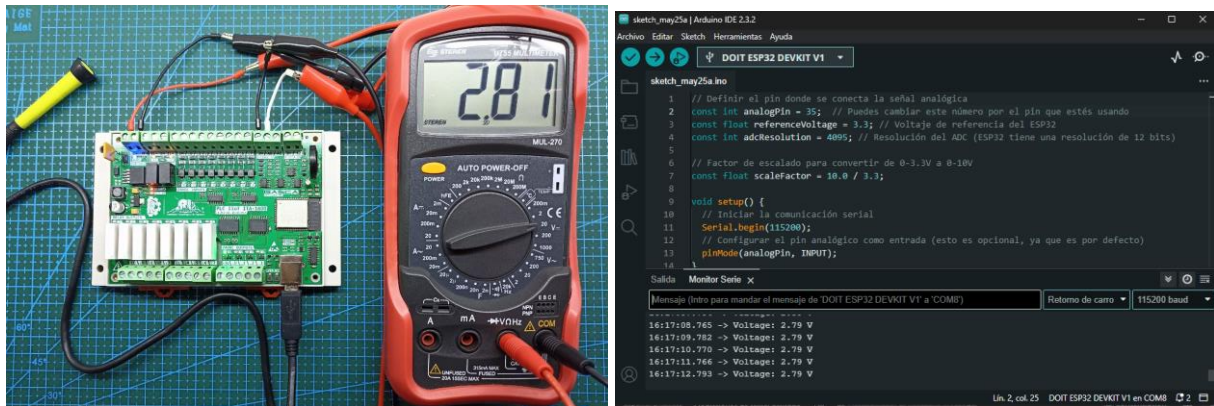


Figura 3.6.6: (a) Voltaje 1 aplicado a la entrada analógica, (b) Voltaje medido por el ESP32.

La figura 3.6.6 (a) muestra el voltaje de prueba 2 medido de 8.58 V aplicado a la entrada analógica A0, la figura 3.6.6 (b) muestra el valor leído por el ESP32 después del acondicionamiento de la señal de 8.59 V.

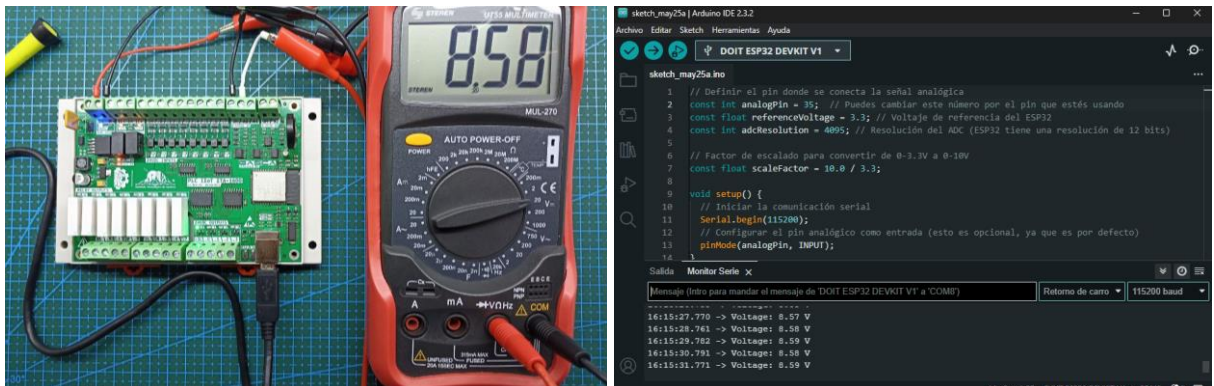


Figura 3.6.7: (a) Voltaje 2 aplicado a la entrada analógica, (b) Voltaje medido por el ESP32.

- **Entradas analógicas 4–20mA**

Para realizar las pruebas de las entradas analógicas se empleó el multímetro digital para medir la corriente en el bucle, proveniente de una fuente de alimentación variable, como se aprecia en las figuras 3.6.8 y 3.6.9.

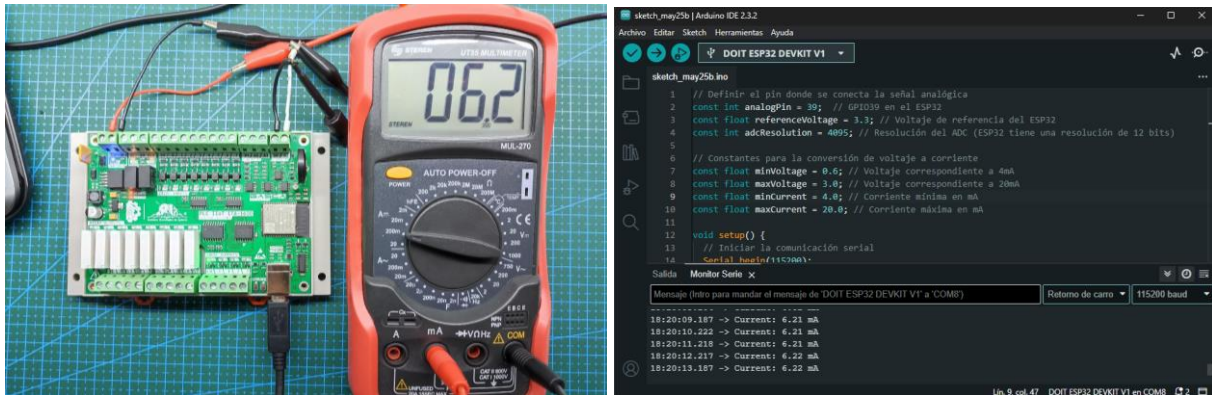


Figura 3.6.8: (a) Corriente 1 aplicada en la entrada analógica, (b) Corriente medida por el ESP32.

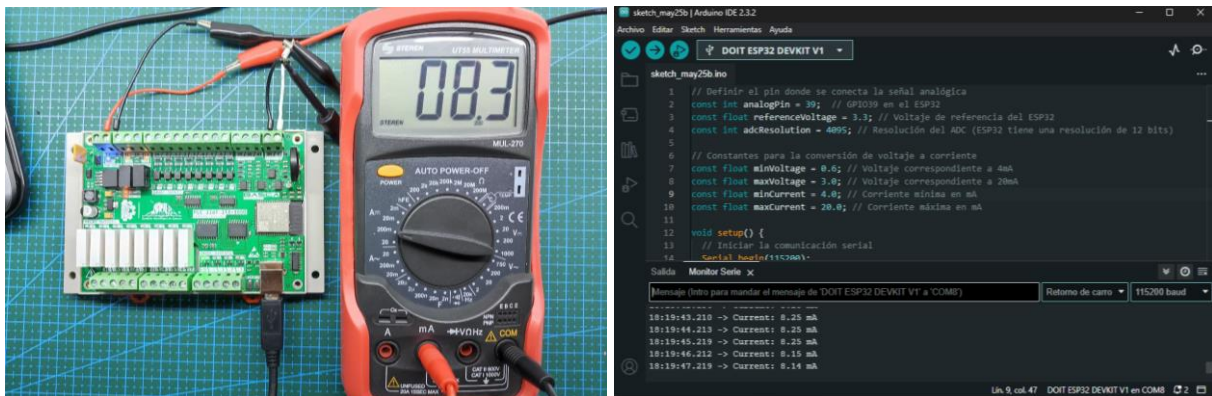


Figura 3.6.9: (a) Corriente 2 aplicada en la entrada analógica, (b) Corriente medida por el ESP32.

Estas pruebas permitieron verificar la precisión y la exactitud del ESP32 al medir las corrientes aplicadas. En la Figura 3.6.8 se puede observar la comparación entre la corriente 1 aplicada en la entrada analógica (a) y la corriente medida por el ESP32 (b). De igual manera, en la Figura 3.6.9 se muestra la comparación para la corriente 2 aplicada (a) y la corriente medida por el ESP32 (b). Estas pruebas son fundamentales para asegurar que el sistema de monitoreo de corrientes funcione correctamente, garantizando la fiabilidad en la adquisición de datos y en el control de los procesos donde se implementa.

- **Salidas a Relevador:**

Se verificó que las salidas actuaran correctamente en respuesta a las señales de control programadas.

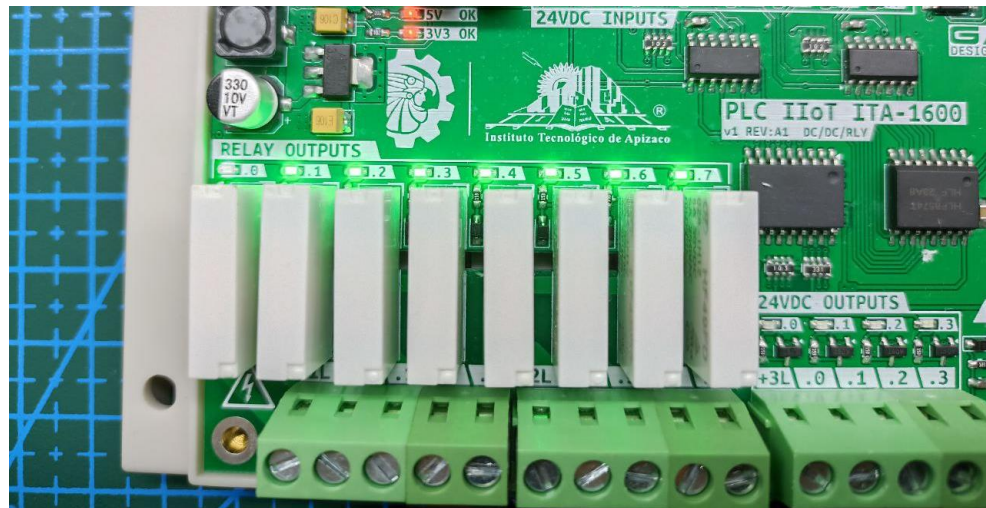


Figura 3.6.10: Prueba de salidas a relevador, LED's indican funcionamiento correcto.

- **Salidas Digitales:**

Se programaron secuencias de prueba para activar y desactivar las salidas digitales en intervalos de tiempo específicos, verificando visualmente el correcto funcionamiento.

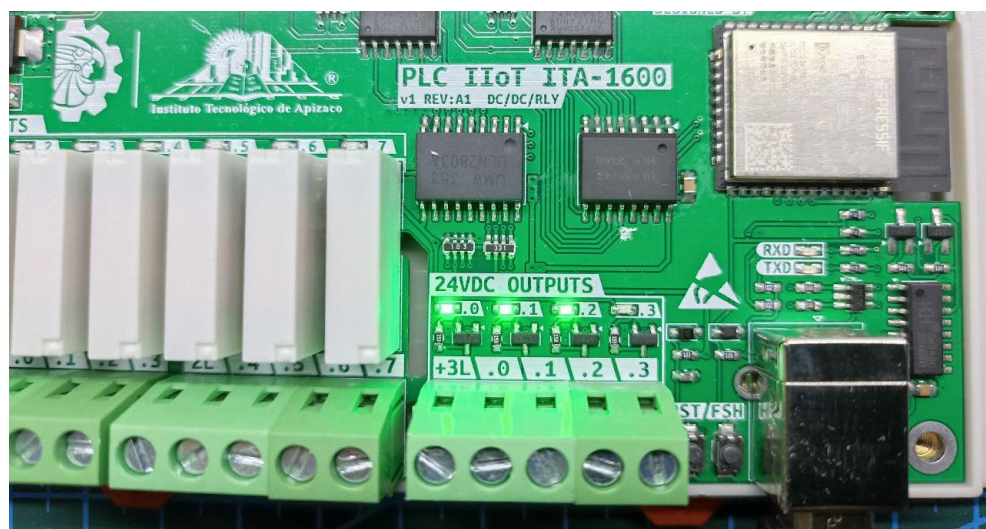


Figura 3.6.11: Prueba de salidas digitales, LED's indican funcionamiento correcto de las salidas.

3.6.2 Pruebas de Integración

Las pruebas de integración se realizaron para evaluar la interacción correcta entre los diferentes componentes y bloques del sistema. En esta fase, los bloques individuales que fueron probados en la etapa de pruebas unitarias se combinan y se verifica que trabajen juntos sin problemas.

3.6.3 Pruebas del Sistema

Las pruebas del sistema verifican la integración completa del PLC, asegurando que todos los componentes y el firmware funcionen como un conjunto coherente. Esta fase implica una evaluación integral del sistema, donde se simulan condiciones de operación reales para verificar el rendimiento y la estabilidad del PLC en su totalidad.

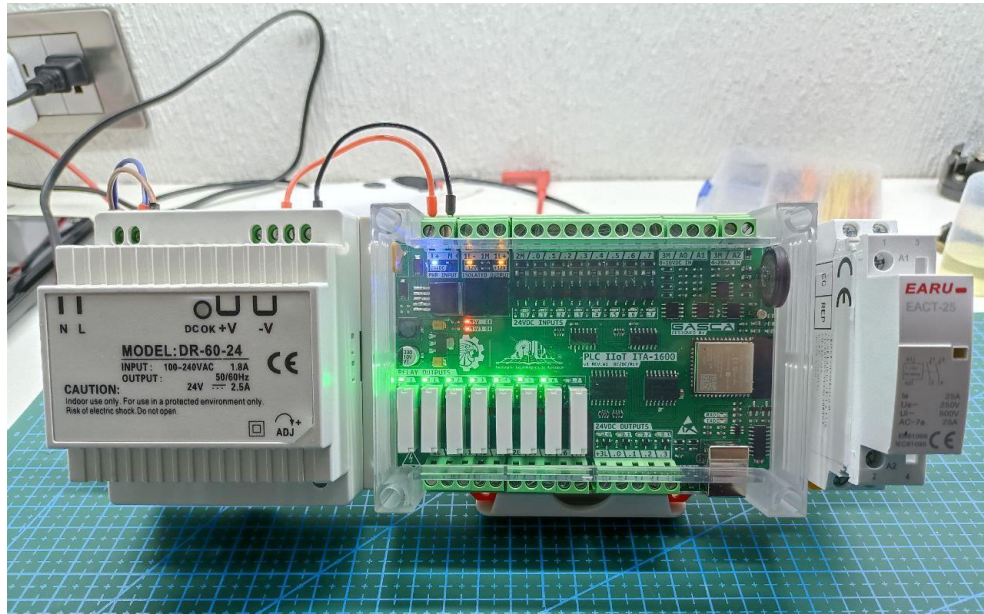


Figura 3.6.12: Prueba del sistema en conjunto con fuente de alimentación y contactor.

3.6.4 Pruebas de Validación

Las pruebas de validación se llevaron a cabo para asegurar que el PLC cumpla con todos los requisitos y especificaciones definidos en la etapa de análisis de requerimientos. Durante esta fase, se realizan pruebas funcionales para verificar que el PLC responda correctamente bajo diversas condiciones operativas. Estas pruebas garantizan que el diseño del PLC sea adecuado para sus aplicaciones previstas en la Industria 4.0.

3.6.5 Pruebas de Aceptación

Las pruebas de aceptación son la fase final de verificación antes de la implementación del PLC en entornos reales. Estas pruebas validan que el PLC cumple con todos los requerimientos y especificaciones necesarios para su uso en aplicaciones IIoT. Durante esta etapa, se realizan pruebas en presencia de los asesores para asegurar que el producto final sea conforme con las expectativas.

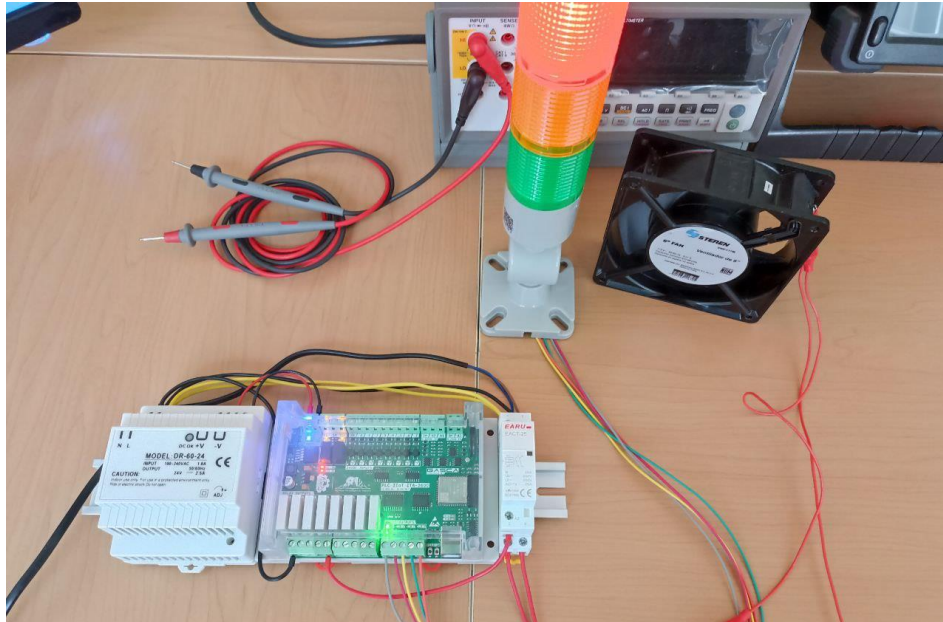


Figura 3.6.13: Prueba de aceptación en el laboratorio en presencia del asesor interno.

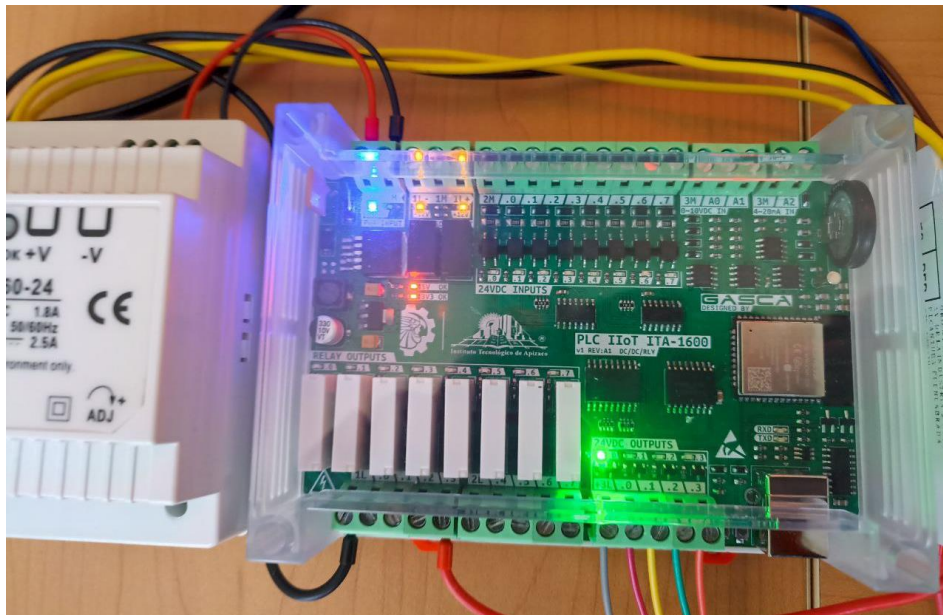


Figura 3.6.14: Prueba de funcionamiento en laboratorio.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Prototipo PLC IIoT ITA-1600

Como resultado final, tras la aplicación de la metodología del modelo V, se consiguió implementar un prototipo funcional del PLC IIoT, denominado ITA-1600. Este prototipo se desarrolló en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Apizaco.

El ITA-1600 se diseñó con el objetivo de superar las limitaciones de conectividad y adaptabilidad presentes en los PLC tradicionales, alineándose con los estándares y requerimientos de la Industria 4.0 de conectividad a internet. A continuación, se detallan las etapas y resultados del desarrollo del prototipo:

- **Definición de Requisitos:**

Se identificaron los objetivos, especificaciones y restricciones del PLC, considerando necesidades específicas de conectividad y rendimiento para aplicaciones IIoT. Se realizó un análisis detallado de los requisitos funcionales y técnicos necesarios para el diseño del dispositivo.

- **Diseño de Alto Nivel:**

Se desarrolló una arquitectura general del sistema en bloques, identificando los componentes clave y sus interconexiones. Este diseño incluyó módulos para entradas digitales y analógicas, salidas a relé y digitales, comunicación inalámbrica, y otros componentes esenciales.

- **Diseño de Componentes:**

En esta etapa, se diseñaron los diagramas esquemáticos y se seleccionaron los componentes específicos para cada bloque del sistema. Se realizaron emulaciones para verificar el funcionamiento de cada bloque en el laboratorio de electrónica.

- **Diseño Detallado:**

Se elaboraron los diagramas esquemáticos detallados y el diseño de la placa de circuito impreso (PCB). Este proceso se llevó a cabo siguiendo normativas IPC para asegurar la calidad y la conformidad del diseño con los estándares industriales.

- **Implementación:**

La implementación involucró la construcción del prototipo, incluyendo la fabricación de las PCBs, la colocación de los componentes, la soldadura y el ensamblaje mecánico del dispositivo. Además, se llevó a cabo la programación y la integración del firmware en el hardware.

- **Pruebas y Validación:**

El prototipo del ITA-1600 fue sometido a una serie de pruebas para garantizar su funcionalidad y robustez. Estas pruebas incluyeron evaluaciones unitarias de cada módulo, pruebas de integración entre los distintos componentes, pruebas del sistema completo en un entorno controlado y pruebas de validación para asegurar que el dispositivo cumpliera con los requisitos y especificaciones iniciales.

Este proceso meticuloso resultó en un prototipo de PLC IIoT robusto y funcional, capaz de integrarse en aplicaciones de la Industria 4.0, mejorando la conectividad y la adaptabilidad para aplicaciones en entornos reales. El ITA-1600 representa una valiosa herramienta educativa para la formación profesional en diseño electrónico y automatización.

La figura 4.1.1 muestra el prototipo final, montado en el carril DIN junto con su fuente de alimentación seleccionada de 24 V @2.5 A a la izquierda, y contactor de 25 A a la izquierda.

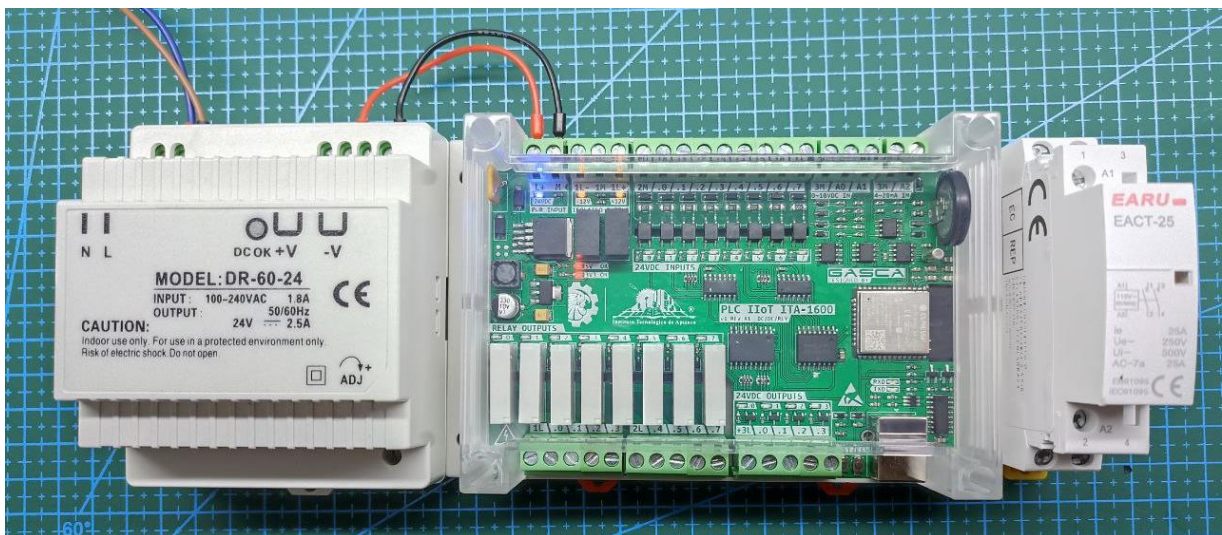


Figura 4.1.1: Prototipo del PLC IIoT ITA-1600 junto con fuente de alimentación y contactor.

4.1.1 Descripción del PLC IIoT ITA-1600

El PLC IIoT ITA-1600 es un controlador lógico programable con capacidades de conectividad inalámbrica para aplicaciones de la industria 4.0. Este dispositivo combina las funcionalidades tradicionales de los PLCs con capacidades de conectividad inalámbrica, proporcionando una solución versátil y moderna para la automatización industrial. A continuación, se detallan las características y componentes principales del ITA-1600:

- **Características Principales**

-Entradas Digitales: El PLC ITA-1600 cuenta con ocho entradas digitales de 12 V~24 V DC, de alta velocidad, capaces de recibir señales de diversos sensores y dispositivos de campo.

-Entradas Analógicas: Dispone de dos entradas analógicas 0 V~ 10 V DC para la integración de sensores que entregan señales en rangos de voltaje, y una entrada analógica de 4~20 mA DC para medición de sensores con bucle de corriente, permitiendo un monitoreo preciso de variables continuas.

-Salidas a Relevador: Cuenta con ocho salidas a relevador, con capacidad de manejo de corriente de 5 A @250VAC, y 5 A @30 VDC.

-Salidas Digitales: Se dispone de cuatro salidas digitales de 24VDC @100 mA, para manejo de cargas de baja potencia, como el uso de semáforos industriales.

-Reloj en Tiempo Real: Integra internamente un circuito integrado de reloj en tiempo real de precisión con respaldo de energía, para proporcionar marcas de tiempo y programar rutinas.

-Wi-Fi y Bluetooth: El PLC está equipado con un módulo ESP32, que proporciona conectividad Wi-Fi y Bluetooth, facilitando la integración con redes industriales y dispositivos móviles para el monitoreo y control remoto.

-Puertos de Comunicación: Incluye puertos USB-UART que permite la programación y configuración del dispositivo.

-Indicadores LED: Los indicadores LED en el panel frontal del PLC muestran el estado operativo y de comunicación del dispositivo, facilitando la supervisión y el diagnóstico.

4.2 Hoja de Datos ITA-1600

Como parte de los resultados de la residencia profesional, se realizó una hoja de datos (ANEXO D) del PLC, que describe las características técnicas del dispositivo, basándose principalmente en las pruebas realizadas y las características de los componentes eléctricos y electrónicos seleccionados.

A continuación, en la tabla 5 se muestra la tabla incluida en la hoja de datos (ANEXO D).

Tabla 5: Características técnicas.

Display	
Con display	No
Indicadores LED	Si
Diseño/Montaje	
Montaje	Sobre perfil normalizado de 35 mm DIN
Voltaje de Alimentación	
Voltaje nominal (DC)	
• 12 V	No
• 24 V	Si
Rango admisible, límite inferior (DC)	22 V
Rango admisible, límite superior (DC)	25 V
Protección de polaridad inversa	Si
Hora	
Respaldo de hora (sin energía principal)	48 Horas
Entradas Digitales	
Nº de Entradas digitales	8
Voltaje de entrada (DC)	12 V ~ 24 V
Frecuencia máxima de operación	1 kHz
Separación galvánica	Si, 3 750 VRMS de aislamiento
Intensidad de entrada para	
• Señal 0	0 mA @0 V
• Señal 1	10.91 mA @24 VDC
Tiempo de retardo	
• Señal 0 a 1	< 1 ms
• Señal 1 a 0	< 1ms
Longitud de conductor sin apantallar	100 m
Entradas Analógicas de 0 V a 10 V	
Nº de Entradas analógicas	2
Rango	0 ... 10 V DC
Impedancia de entrada	> 1 MΩ
Protección de polaridad inversa y sobrevoltaje	Si, 24 V DC máx.
Separación galvánica	No
Longitud de conductor trenzado y apantallado	10 m

Entradas Analógicas de 4 mA a 20 mA	
Nº de Entradas analógicas	1
Rango	4 ... 20 mA DC
Impedancia de entrada	150 Ω
Protección de polaridad inversa	Si
Separación galvánica	No
Longitud de conductor trenzado y apantallado	10 m
Salidas a Relevador	
Nº de Salidas a relevador	8
En grupos de	4
Separación galvánica	Si
Voltaje de operación por relevador	
• 250 VAC	5 A AC
• 30 VDC	5 A DC
Frecuencia máxima mecánica	10 Hz
Resistencia mecánica	20 000 000 de operaciones
Resistencia eléctrica	50 000 (3A 250VAC/30VDC) carga resistiva 1s on 9s off
Salidas Digitales	
Nº de Salidas digitales	3
En grupos de	1
Separación galvánica	No
Tipo de salida	Transistor N-MOS conexión N
Voltaje de operación por transistor	
• 24 VDC	100 mA por transistor
Protección contra cortocircuito y sobrecarga	No
Frecuencia máxima eléctrica	1 kHz
Conectividad y CPU	
Bluetooth	• Bluetooth V4.2 BR/EDR and Bluetooth LE specification • Class-1, class-2 and class-3 transmitter • AFH • CVSD and SBC
Wi-Fi	• 802.11b/g/n • Bit rate: 802.11n up to 150 Mbps • A-MPDU and A-MSDU aggregation • 0.4 μs guard interval support • Center frequency range of operating channel: 2412 ~ 2484 MHz

CPU y Memoria interna

- ESP32-D0WD-V3 or ESP32-D0WDR2-V3 embedded, Xtensa dual-core 32-bit LX6 microprocessor, up to 240 MHz
- 448 KB ROM
- 520 KB SRAM
- 16 KB SRAM in RTC
- ESP32-D0WDR2-V3 also provides 2 MB PSRAM

Condiciones ambientales

Temperatura ambiente en servicio	20 °C (sin condensación) a 55 °C
Temperatura ambiente en almacenaje	40 °C a 70 °C

Dimensiones

Ancho	145 mm
Altura	90 mm
Profundidad	40 mm

Esta tabla 5 se hizo en base a hojas de datos de dispositivos PLC del mercado, haciendo así la documentación técnica del proyecto de manera más profesional.

Posteriormente se realizó una descripción de los terminales del PLC, donde se señala para cada bloque de terminales. La figura 4.1.2 muestra la descripción de cada bloque de terminales del PLC.

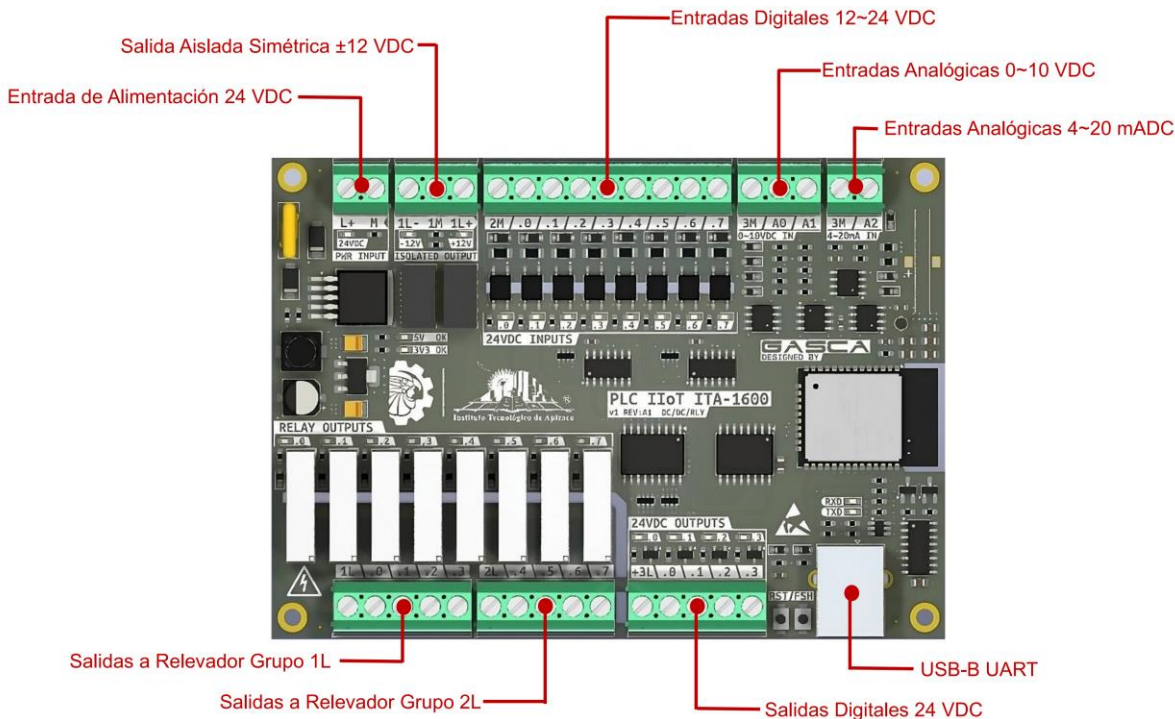


Figura 4.1.2: Vista superior del PLC descripción de terminales.

De igual manera, en la hoja de datos (ANEXO D) también se agregó la descripción de cada terminal, visto en la figura 4.1.2. A continuación, se lista la descripción de cada terminal, así como su conexión interna hacia el CPU.

Tabla 6: Descripción de terminales del PLC.

BLOQUE	TERMINAL	DESCRIPCIÓN	GPIO ESP32
Alimentación	L+	Entrada positiva de 24 VDC	
	M	Entrada negativa (GND)	
	1L-	Salida negativa aislada -12 VDC	
	1M	Salida aislada GND flotante	
	1L+	Salida positiva aislada +12 VDC	
Entradas Digitales	2M	GND de entradas digitales	
	.0	Entrada digital .0	I2C
	.1	Entrada digital .1	I2C
	.2	Entrada digital .2	I2C
	.3	Entrada digital .3	I2C
	.4	Entrada digital .4	I2C
	.5	Entrada digital .5	I2C
	.6	Entrada digital .6	I2C
	.7	Entrada digital .7	I2C
Entradas Analógicas	3M	GND de entradas analógicas	
	A0	Entrada analógica A0	GPIO 34
	A1	Entrada analógica A1	GPIO 35
	A2	Entrada analógica A2	GPIO 39
Salidas a Relevador	1L	Conexión común grupo 1L	
	.0	Salida relevador .0 de grupo 1L	GPIO 17
	.1	Salida relevador .1 de grupo 1L	GPIO 16
	.2	Salida relevador .2 de grupo 1L	GPIO 04
	.3	Salida relevador .3 de grupo 1L	GPIO 32
	2L	Conexión común grupo 2L	
	.4	Salida relevador .4 de grupo 2L	GPIO 33
	.5	Salida relevador .5 de grupo 2L	GPIO 25
	.6	Salida relevador .6 de grupo 2L	GPIO 26
Salidas Digitales	.7	Salida relevador .7 de grupo 2L	GPIO 27
	+3L	Conexión común +24 VDC	
	.0	Conexión salida modo drenador .0	GPIO 05
	.1	Conexión salida modo drenador .1	GPIO 18
	.2	Conexión salida modo drenador .2	GPIO 19
	.3	Conexión salida modo drenador .3	GPIO 23

Las entradas digitales están conectadas a un expensor de E/S con número de parte PCF8574, configurado con la dirección I2C 0x20. El reloj en tiempo real (RTC) utiliza la dirección I2C 0x68.

En la hoja de datos también se agregó la descripción de los LED's indicadores presentes en la placa El PLC IIoT ITA-1600 está equipado con indicadores LED que proporcionan información visual sobre el estado de las entradas y el funcionamiento del sistema. Estos LEDs permiten verificar rápidamente si una entrada está recibiendo una señal y si el voltaje en la placa es correcto. A continuación, se detalla la función de cada uno de estos indicadores.

- **Fuente de Alimentación:**

La sección de la fuente de alimentación del ITA-1600 cuenta con varios indicadores LED que permiten verificar el correcto funcionamiento del sistema de alimentación. A continuación, se detalla la función de cada uno de estos LED:

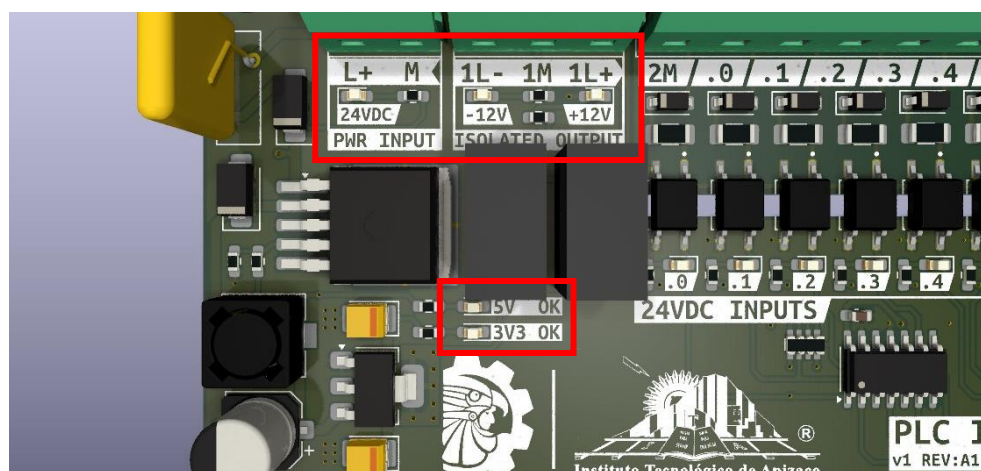


Figura 4.1.3: Señalamiento de LED's indicadores en placa del PLC.

-LED Azul (24 VDC): Este LED se enciende para indicar que la alimentación de 24 VDC está siendo recibida correctamente y que la polaridad es adecuada. Si este LED no está encendido, podría indicar un problema con la fuente de alimentación externa o una conexión incorrecta.

-LEDs Amarillos (+12 VDC y -12 VDC): Hay dos LEDs amarillos que indican el estado de las salidas aisladas de voltaje simétrico. Uno de ellos indica la salida de +12 VDC y el otro la salida de -12 VDC. Estos LEDs se encienden cuando los voltajes respectivos están presentes y correctos. Cada LED está etiquetado con la serigrafía correspondiente para facilitar su identificación.

-LEDs Rojos (5 VDC y 3.3 VDC): Estos LEDs rojos señalan que los voltajes de nivel lógico internos del PLC están funcionando correctamente. Uno de los LEDs indica la presencia de 5

VDC y el otro de 3.3 VDC. Estos voltajes son críticos para el funcionamiento interno del PLC, y la ausencia de cualquiera de estos LEDs durante la operación normal sugiere un problema en la etapa de alimentación o un estado anormal de funcionamiento.

En condiciones normales de operación, todos estos LEDs deben estar encendidos. La ausencia de iluminación en cualquiera de estos indicadores señala un posible fallo en la etapa de alimentación que debe ser investigado para asegurar el correcto funcionamiento del PLC

- **Entradas Digitales:**

Cada una de las ocho entradas digitales cuenta con un LED verde que se enciende cuando una señal está presente en esa entrada. Estos LEDs permiten una rápida verificación visual de la actividad de las entradas digitales. Cuando un LED está encendido, indica que la entrada asociada está recibiendo una señal. La serigrafía en la placa junto a cada LED ayuda a identificar la entrada que está activa

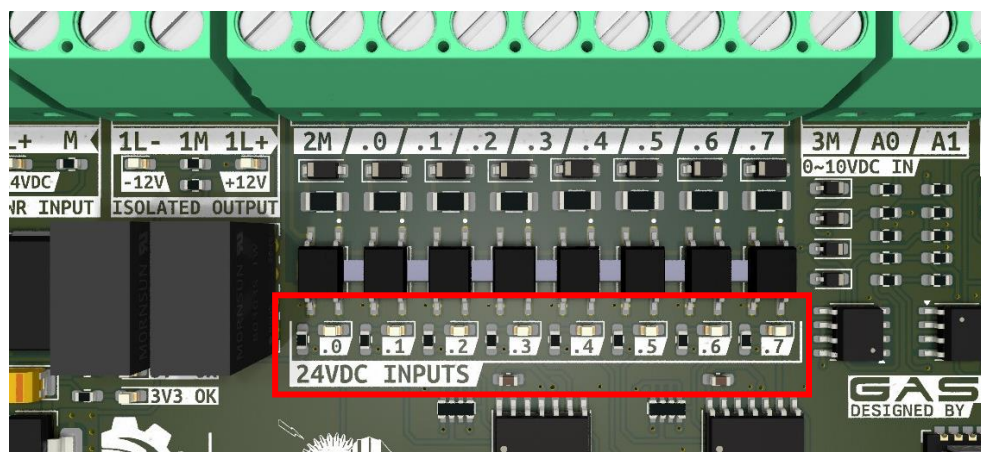


Figura 4.1.4: Señalamiento de LED's indicadores de entradas digitales.

- **Salidas a Relevador:**

Las salidas a relevador del PLC están equipadas con indicadores LED verdes que se iluminan para indicar el estado operativo de cada relevador. Estos LEDs proporcionan una retroalimentación visual instantánea sobre qué relevadores están activos en un momento dado. La serigrafía de la placa del PLC identifica claramente cada LED asociado con su salida a relevador respectiva.



Figura 4.1.5: Señalamiento de LED's indicadores de salidas a relevador.

- **Salidas Digitales:**

Las salidas digitales del PLC están equipadas con cuatro LEDs individuales que indican el estado de activación de cada salida. Cada LED color verde se ilumina para mostrar visualmente cuándo una salida específica está activa.

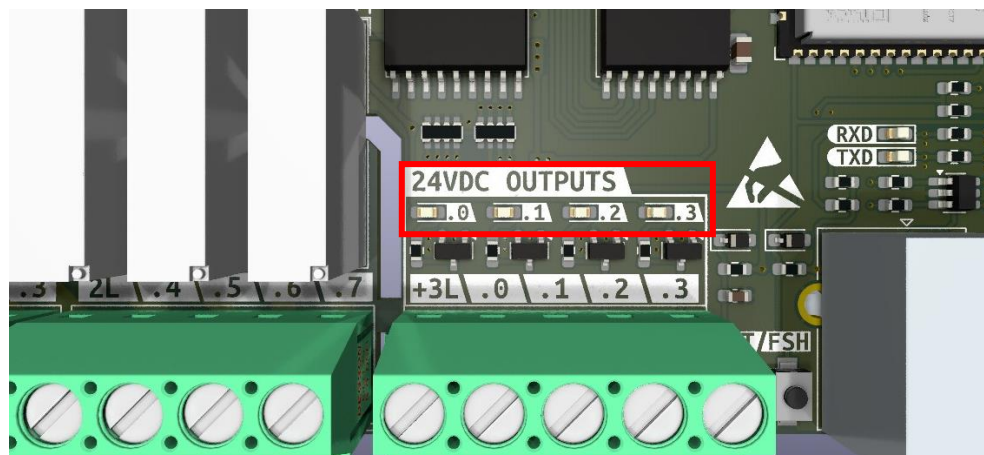


Figura 4.1.6: Señalamiento de LED's indicadores de salidas a relevador.

- **Transmisión y Recepción de Datos por USB:**

El PLC está equipado con dos LEDs amarillos que indican la transmisión (TXD) y recepción (RXD) de datos exitosa entre el PLC y dispositivos periféricos o la computadora a través de USB. Estos LEDs proporcionan una clara retroalimentación visual sobre el estado de la comunicación USB.

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones del Proyecto

Basándose en el planteamiento de objetivos y respaldado por los resultados tangibles del proyecto desarrollado, se concluye que el Controlador Lógico Programable (PLC) con Comunicación Inalámbrica para Aplicaciones de la Industria 4.0 cumplió con los objetivos planteados y que representa una contribución al campo del diseño electrónico y la automatización industrial.

Durante la realización del proyecto se enfrentaron distintos factores imprevistos que podrían haber retrasado el desarrollo. Sin embargo, estos obstáculos fueron superados mediante la dedicación y el esfuerzo, lo que permitió no solo alcanzar los objetivos establecidos, sino también adquirir valiosas lecciones sobre gestión de proyectos y resolución de problemas. Estas experiencias serán fundamentales para abordar proyectos más complejos en el futuro, obteniendo así una mayor confianza y habilidad en el campo del diseño electrónico.

El proyecto ha cumplido exitosamente su objetivo general de diseñar e implementar un PLC que cumpla con los requisitos de conectividad y flexibilidad exigidos. Este logro se ha apoyado en la aplicación de conocimientos teóricos y prácticos adquiridos durante la formación en Ingeniería Electrónica, lo que ha permitido superar los desafíos técnicos asociados con el desarrollo de dispositivos electrónicos avanzados.

Además, el PLC desarrollado se posiciona como una valiosa herramienta educativa para la formación profesional en el campo del diseño electrónico y la automatización industrial, al proporcionar una comprensión detallada sobre el funcionamiento interno de un PLC y ofrecer oportunidades de aprendizaje práctico. Su versatilidad y adaptabilidad abren puertas a la mejora continua y la adaptación, consolidando este proyecto como un avance significativo en el diseño electrónico dentro del ámbito académico.

5.2 Recomendaciones

El diseño electrónico es un campo fascinante que requiere creatividad e ingenio para llevar a cabo proyectos exitosos. No obstante, abarca un amplio rango de conocimientos en ingeniería electrónica que resultan necesarios para el diseño de cualquier dispositivo, lo que puede resultar abrumador para aquellos que desean adentrarse en este campo. Se recomienda encarecidamente involucrarse en diversos proyectos donde se pueda aplicar la electrónica. Es crucial aprender de cada experiencia, ya que esto es lo que construye la verdadera experiencia en el diseño electrónico.

Uno de los principales desafíos encontrados en el proyecto fue la gestión del tiempo. Al tratarse de un proyecto integral que requería considerar muchos aspectos, el tiempo planeado fue justo y no se tomaron en cuenta posibles problemas, como circuitos integrados defectuosos, retrasos en la entrega de materiales o cambios en el diseño. Estos factores provocaron que algunas actividades tuvieran que ser reprogramadas. Dado que la metodología del modelo V es lineal y no permite avanzar sin completar etapas anteriores, se recomienda que en la planificación de cualquier proyecto se asignen plazos que contemplen posibles problemas y se establezcan plazos de desarrollo más flexibles.

Otra recomendación crucial es seguir siempre los parámetros y directrices de diseño especificados en las hojas de datos de los componentes electrónicos. Ignorar estas recomendaciones, ya sea para ahorrar espacio en la PCB o reducir costos omitiendo ciertos componentes, puede resultar en un circuito susceptible a daños. Por ejemplo, la falta de un condensador de desacoplamiento o un diodo de protección puede exponer el circuito a ruidos eléctricos, picos de voltaje o corrientes excesivas, comprometiendo la estabilidad y funcionalidad del sistema. En consecuencia, no seguir las especificaciones del fabricante puede llevar a un rendimiento inadecuado, fallos en el circuito y potencialmente costosos re-diseños. Por ello, es esencial adherirse a las directrices establecidas para garantizar la fiabilidad y eficacia del diseño electrónico.

Con respecto al prototipo, recomendaría a futuro incluir la posibilidad de agregar una interfaz de pantalla táctil. Esta mejora permitiría una interacción más intuitiva y directa con el sistema, facilitando la configuración, monitoreo y control de los procesos. Además, una pantalla táctil podría integrar gráficos y visualizaciones en tiempo real, lo que ayudaría a los usuarios a interpretar mejor los datos y tomar decisiones informadas rápidamente.

5.3 Experiencia Profesional Adquirida

Durante mi participación en el proyecto llevado a cabo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Apizaco, obtuve una valiosa experiencia profesional que enriqueció mi formación como ingeniero electrónico. En primer lugar, me enfrenté a desafíos en el campo del diseño electrónico. Trabajar en un entorno académico me brindó la oportunidad de aplicar los conocimientos teóricos adquiridos durante mis estudios universitarios a situaciones prácticas y concretas.

Además, enfrenté desafíos en la gestión del tiempo y la planificación de proyectos. Sin embargo, aprendí a anticipar posibles obstáculos y a tomar decisiones rápidas y efectivas para resolver problemas durante el desarrollo del proyecto. Esta experiencia me enseñó la importancia de la flexibilidad y la adaptabilidad en un entorno académico y profesional, permitiéndome superar los contratiempos y continuar avanzando hacia la meta.

En cuanto a habilidades técnicas, adquirí conocimientos específicos relacionados con el diseño de dispositivos electrónicos. Además, tuve la oportunidad de familiarizarme con el uso de herramientas e instrumentos de medición que son comúnmente utilizados en entornos corporativos. También desarrollé habilidades en el manejo de software especializado y en la interpretación y análisis de datos técnicos, lo que me permitió tomar decisiones fundamentadas durante el proceso de diseño y desarrollo del proyecto.

Durante mi participación en el proyecto en el Instituto Tecnológico de Apizaco, pude confirmar la aplicabilidad de los conocimientos adquiridos durante mi carrera de ingeniería electrónica en situaciones prácticas y concretas. Esta experiencia me ha demostrado la importancia de mantenerme actualizado sobre nuevos circuitos, técnicas y componentes, ya que la ingeniería electrónica abarca una amplia gama de aplicaciones en la vida cotidiana, desde vehículos eléctricos hasta la industria 4.0 y la medicina. Además, he aprendido que especializarse en un área específica que se alinee con mis intereses personales es fundamental para desarrollarme profesionalmente en el campo del diseño electrónico.

Mi participación en el proyecto en el Instituto Tecnológico de Apizaco fue una experiencia enriquecedora que contribuyó significativamente a mi crecimiento profesional. Agradezco la oportunidad de haber trabajado en este proyecto y estoy seguro de que las habilidades y conocimientos adquiridos me serán de gran utilidad en mis futuros estudios de posgrado y así poder seguir preparándome profesionalmente.

Competencias Desarrolladas y/o Aplicadas

Durante la residencia profesional en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Apizaco, se desarrollaron y aplicaron diversas competencias fundamentales para la formación como Ingeniero Electrónico. Estas competencias fueron adquiridas a lo largo de la carrera y se fortalecieron durante la ejecución del proyecto de desarrollo del PLC IIoT. A continuación, con base en el perfil de egreso, se destacan las siguientes competencias que se aplicaron en el proyecto:

- **Diseñar, analizar y construir equipos y/o sistemas electrónicos:** Se desarrollaron habilidades para el diseño y análisis de circuitos, la construcción de prototipos, y la implementación de sistemas electrónicos complejos como el PLC con capacidades de comunicación inalámbrica aplicando normas internacionales.
- **Crear, innovar y transferir tecnología:** El proyecto implicó la innovación en el diseño del PLC, incorporando tecnologías avanzadas de la Industria 4.0. Además, se documentaron y compartieron los resultados, facilitando la transferencia de tecnología.
- **Expresar ideas de forma oral y escrita:** Durante el proyecto, se realizaron presentaciones, se redactaron informes técnicos, manuales de usuario, hojas de datos y se realizaron propuestas de diseño, fortaleciendo la capacidad de comunicación técnica.
- **Asumir actitudes emprendedoras y de liderazgo:** La coordinación del proyecto, la gestión de tiempos y recursos, y la resolución de problemas inesperados demostraron actitudes de liderazgo y emprendimiento.
- **Desarrollar aplicaciones en lenguajes de programación de alto nivel:** Se desarrollaron códigos y algoritmos de control utilizando lenguajes de programación como C y C++, esenciales para el funcionamiento del PLC.
- **Operar equipo de medición y prueba para diagnóstico y análisis de parámetros eléctricos:** Se utilizó equipo de medición y prueba utilizados en la industria electrónica como multímetro de banco, generador de funciones y osciloscopio para diagnosticar y validar el correcto funcionamiento de los componentes y circuitos del PLC.

Estas competencias se desarrollaron y aplicaron durante la residencia profesional, contribuyendo a la formación integral como Ingeniero Electrónico y preparándose así para enfrentar los desafíos del ámbito profesional en el campo de la electrónica.

A lo largo de la residencia profesional, se aplicaron diversas asignaturas que conforman el plan de estudios de la carrera de Ingeniería Electrónica. Dado que se trató de un proyecto integral, se pusieron en práctica múltiples competencias para asegurar su exitoso desarrollo. A continuación, se enumeran las asignaturas más relevantes aplicadas al proyecto y cómo influyeron en el mismo:

- **Fundamentos de la Investigación (ACC-0906), Taller de Investigación (ACA-0909), Taller de Investigación II (ACA-0910):** Estas asignaturas fueron fundamentales para realizar una investigación exhaustiva necesaria para desarrollar e implementar el Controlador Lógico Programable IIoT. Permitieron adquirir habilidades para buscar información técnica relevante, evaluar fuentes de información y documentar formalmente los hallazgos y desarrollos del proyecto.
- **Mediciones Eléctricas (ETD-1021):** Esta asignatura proporcionó las bases para comprender y aplicar conceptos básicos de mediciones eléctricas utilizando instrumentos y equipos, lo cual fue esencial para el diseño y la implementación del PLC. Facilitó el uso adecuado de instrumentos para medir y analizar señales eléctricas y electrónicas.
- **Programación Estructurada (ETD-1024):** Permitió desarrollar habilidades para diseñar algoritmos y crear programas de aplicación necesarios para la programación del microcontrolador que gestiona el PLC, utilizando lenguajes de alto nivel como C y C++.
- **Circuitos Eléctricos I (ETF-1004), Circuitos Eléctricos II (ETF-1005):** Proporcionaron los conocimientos necesarios para analizar y resolver circuitos eléctricos, aplicando leyes fundamentales como la ley de Ohm y las leyes de Kirchhoff y demás leyes fundamentales para calcular valores de componentes electrónicos críticos y conocer cómo se compartiría un circuito electrónico.
- **Diodos y Transistores (ETF-1012), Diseño con Transistores (ETF-1013), Amplificadores Operacionales (ETF-1002):** Facilitaron el análisis, diseño e implementación de circuitos con diodos, transistores y amplificadores operacionales, componentes críticos utilizados en el PLC.
- **Diseño Digital (ETF-1014), Microcontroladores (ETD-1022):** Proveyeron las habilidades necesarias para desarrollar la lógica de control y la programación del microcontrolador ESP32 del PLC, aplicando circuitos integrados digitales en su diseño.

- **Máquinas Eléctricas (AEF-1040), Ingeniería Eléctrica (CAJ-2001):** Permitieron comprender el tipo de cargas que manejará el PLC y seleccionar los componentes adecuados, así como elementos de manejo para aplicaciones industriales.
- **Instrumentación (AEF-1038):** Enseñó a seleccionar instrumentos de medición y control, habilidades aplicadas en el desarrollo de las entradas digitales y analógicas del PLC.
- **Optoelectrónica (ETF-1023):** Facilitó el uso de optoacopladores y LEDs en el diseño del PLC, proporcionando conocimientos sobre dispositivos optoelectrónicos y su aplicación en circuitos electrónicos.
- **Introducción a las Telecomunicaciones (ETF-1019):** Permitió comprender, operar e integrar sistemas de comunicaciones electrónicas, habilidades aplicadas en la conectividad a Internet y Bluetooth del PLC.
- **Controladores Lógicos Programables (ETF-1008):** Proporcionó los conocimientos necesarios sobre el funcionamiento y la programación de los PLCs, fundamentales para diseñar un PLC.
- **Fundamentos de la Industria 4.0 (CAG-2002), Automatización en la Industria 4.0 (CAG-2004):** Facilitaron la comprensión de los principios y tecnologías de la Industria 4.0, esenciales para diseñar un PLC que integra tecnologías modernas de automatización y conectividad.

Con este proyecto, concluyo mi carrera de ingeniería electrónica, donde he podido aplicar y consolidar las habilidades y conocimientos adquiridos a lo largo de mi carrera académica. La experiencia de diseñar e implementar un Controlador Lógico Programable (PLC) con ha sido invaluable, permitiéndome enfrentar desafíos técnicos reales y desarrollar soluciones innovadoras. Este proyecto representa no solo el cierre de una etapa académica, sino también el inicio de una trayectoria profesional en el campo del diseño electrónico.

Fuentes de Información

- Editora Microbyte. (2023). *PLC: La evolución de un pequeño gigante*. Obtenido de Resvista ElectroIndustria: <https://tinyurl.com/msujyc9e>
- 330ohms. (11 de junio de 2021). *¿Qué son las normas IPC?* Obtenido de Blog 330ohms: <https://tinyurl.com/3wwkhehn>
- 5Hertz. (s.f.). *DIVISORES DE VOLTAJE*. Obtenido de 5Hertz Blog: <https://tinyurl.com/546n2dn2>
- Aka, A. (29 de marzo de 2021). *Why recommend tantalum over ceramic capacitor for voltage regulator?* Obtenido de Stack Exchange - Electrical Engineering: <https://tinyurl.com/45945p7m>
- ALFAIOT. (17 de septiembre de 2023). *KICAD: el software estrella para el diseño de pcb*. Obtenido de ALFAIOT-WEBMASTER: <https://tinyurl.com/2bmve68>
- All About Circuits. (s.f.). *Low-pass Filters*. Obtenido de All About Circuits Blog: <https://tinyurl.com/48xhmcsn>
- ALL ABOUT ELECTRONICS. (6 de octubre de 2020). *Operational Amplifier: Non-Inverting Op-Amp and Op-Amp as Buffer*. Obtenido de All About Electronics Blog: <https://tinyurl.com/mrvmcvuj>
- Amidata. (20 de agosto de 2023). *Guía de PLC (Controladores lógicos programables)*. Obtenido de RS-Online: <https://tinyurl.com/56js5vse>
- Analog Devices. (29 de noviembre de 2001). *DC to DC Buck Converter Tutorial & Diagram*. Obtenido de Analog Devices: <https://tinyurl.com/42skwh8e>
- Analog Devices. (s.f.). *Low-Pass Filter*. Obtenido de Analog Devices Blog: <https://tinyurl.com/2thkdk7y>
- André, L. (17 de marzo de 2020). *Criterios de aceptación IPC 610 ¿Que son?* Obtenido de ALDELTA Technologies: <https://tinyurl.com/2zswewpu>
- Bestaş. (s.f.). *Comprender las diferencias: Convertidores DC-DC aislados y no aislados*. Obtenido de Bestaş: <https://tinyurl.com/5n7t48d7>
- Bhattacharya, A. (17 de agosto de 2020). *ESD Protection of USB 2.0 Interfaces*. Obtenido de Semtech: <https://tinyurl.com/4ctvve36>
- BrtLED. (2022). *Datasheet: LED yellow 0603 BL-HKC36D-AV-TRB*. Obtenido de LCSC Electronics: <https://tinyurl.com/2medr4jp>
- COMASTECH. (13 de diciembre de 2022). *comastech blog*. Obtenido de PLC'S, HISTORIA Y OBJETIVOS DE LA AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL: <https://tinyurl.com/5c5sc85n>
- Dejan. (s.f.). *Transistor Schmitt Trigger Working Principle*. Obtenido de HowToMechatronics: <https://tinyurl.com/5a45xevx>
- Deloitte. (2024). *¿Qué es la Industria 4.0?* Obtenido de Deloitte Blog: <https://tinyurl.com/bdfzafms>

Electronic Tutorials. (s.f.). *Darlington Transistors*. Obtenido de Basic Electronic Tutorials:
<https://tinyurl.com/ycx7hh9w>

Electronic Tutorials. (s.f.). *Electrical Relay*. Obtenido de Basic Electronic Tutorials:
<https://tinyurl.com/2pf9e7sz>

Electronic Tutorials. (s.f.). *MOSFET as a Switch*. Obtenido de Basic Electronic Tutorials:
<https://tinyurl.com/f57mufrz>

Electronic Tutorials. (s.f.). *Passive Low Pass Filter*. Obtenido de Electronic Tutorials Blog:
<https://tinyurl.com/w4hjhaft>

ElectronicsTutorials. (1 de abril de 2014). *Optocoupler Tutorial*. Obtenido de Blog ElectronicsTutorials:
<https://tinyurl.com/42xrybcw>

Espressif. (2023). *Datasheet: ESP32-WROOM-32E*. Obtenido de Espressif Systems:
<https://tinyurl.com/yx76b6sp>

Faheemuddin, M. (13 de febrero de 2024). *The Importance of PCB Line Spacing, Creepage, and Clearance*. Obtenido de Sierra Circuits : <https://tinyurl.com/3e92zuh8>

GOODWORK. (2021). *Datasheet: SOT-23 Plastic-Encapsulate MOSFETS* . Obtenido de LCSC Electronics:
<https://tinyurl.com/yc2abj6a>

GSL Industries. (1 de junio de 2021). *¿QUÉ ES UN PLC Y CÓMO FUNCIONA?* Obtenido de GSL Industries Blog: <https://tinyurl.com/4k4axhw2>

HF. (2015). *Datasheet: Power Realy HF49FD*. Obtenido de LCSC Electronics:
<https://tinyurl.com/mr6rxd47>

HGSEMI. (2018). *Datasheet: DS1307 64 x 8, Serial, I2C Real Time Clock*. Obtenido de LCSC Electronics:
<https://tinyurl.com/39bh7fhr>

HGSEMI. (2018). *Datasheet: Remote 8-bit I/O expander for I2C-bus PCF8574*. Obtenido de LCSC Electronics: <https://tinyurl.com/9rsphy95>

Horowitz, P. (2016). *The Art of Electronics*. Nueva York Estados Unidos: Cambridge University Press.

HTC. (2020). *Datasheet: Hex Schmitt Trigger Inverters 74HC14D*. Obtenido de LCSC Electronics:
<https://tinyurl.com/5fuxztk2>

HWE Tech & Consulting. (s.f.). *V-model in Electrical Systems Engineering*. Obtenido de Hardware and Systems Engineering Design: <https://www.hwe.design/system-design/what-is-hardware-system-design/v-model-in-systems-engineering>

Iberdrola. (2023). *¿Qué es el IIoT? Descubre el Internet Industrial de las Cosas*. Obtenido de Iberdrola Blog: <https://tinyurl.com/m5zk2aa5>

IBM. (2023). *¿Qué es la Industria 4.0?* Obtenido de IBM México: <https://tinyurl.com/2vyrbe4k>

iPCB Circuits Limited. (s.f.). *Qué es el nivel IPC Criterios de aceptación de PCB*. Obtenido de iPCB Circuits : <https://tinyurl.com/2he9w3k8>

JCST. (2011). *Datasheet: SOD-323 Plastic-Encapsulate Diodes 1N4148WS*. Obtenido de LCSC Electronics: <https://tinyurl.com/zkz2vyrf>

JIMBLOM. (s.f.). *Voltage Dividers*. Obtenido de SparkFun Electronics: <https://tinyurl.com/3aukr5ck>

JLCPCB. (13 de septiembre de 2023). *5 Common Beginner PCB Design Mistakes (And How to Avoid Them)*. Obtenido de JLCPCB Blog: <https://tinyurl.com/5xcukf7e>

JLCPCB. (2024). *PCB Manufacturing & Assembly Capabilities*. Obtenido de JLCPCB : <https://tinyurl.com/5n9atpxh>

John. (s.f.). *Una Guía Completa Sobre Cómo Determinar los Productos de la Clase IPC*. Obtenido de OurPCB Tech: <https://tinyurl.com/4n3t794b>

Keeping, S. (20 de octubre de 2020). *Use Isolated DC-DC Converters with Embedded Transformers to Ease Assembly*. Obtenido de DigiKey Blog: <https://tinyurl.com/2p9yruez>

KEXIN. (2019). *Datasheet: Single Supply Dual Operational Amplifiers LM358*. Obtenido de LCSC Electronics: <https://tinyurl.com/ra45n2sn>

Laverde, A. (23 de julio de 2019). *Criterios de evaluación de soldadura SMD con IPC 610*. Obtenido de ALDELTA Technologies: <https://tinyurl.com/mrxpsvvs>

Laverde, A. (19 de marzo de 2020). *IPC 600 e IPC 610 para manufactura de PCB*. Obtenido de ALDELTA Technologies: <https://tinyurl.com/ytxcrzkd>

Leibson, S. (9 de octubre de 2018). *Fundamentals of Current Measurement: Part 1 – Current Sense Resistors*. Obtenido de DigiKey Blog: <https://tinyurl.com/3psp663e>

Littelfuse. (2016). TECH PAPER: Fundamentals of Resettable Functionality in PPTC Devices. *Littelfuse*, 6. Obtenido de <https://tinyurl.com/4u7ee3v2>

LZTEC. (2017). *Datasheet: DC-DC Isolated Converter B2412S-1W*. Obtenido de LCSC Electronics: <https://tinyurl.com/2uc8bm7z>

Matric Group . (06 de mayo de 2022). *IPC Standards Chart for U.S*. Obtenido de Blog Matric Group: <https://tinyurl.com/a4zcjdzv>

MDD. (2021). *Datasheet: B5819W*. Obtenido de LCSC Electronics: <https://tinyurl.com/yw6bk7kz>

Microchip Tech. (2020). *Datasheet: 1 MHz, Low-Power Op Amp - MCP6001/1R/1U/2/4*. Obtenido de LCSC Electronics: <https://tinyurl.com/32esvb3k>

MSKSEMI. (2020). *Datasheet: Dual Operational Amplifiers LM358*. Obtenido de LCSC Electronics: <https://tinyurl.com/4fjksu4d>

Naylamp Mechatronics SAC . (s.f.). *CONVERTIDOR VOLTAJE DC-DC STEP-DOWN*. Obtenido de Naylamp Mechatronics SAC : <https://tinyurl.com/yfdr3848>

Oji, O. (2024). Application Note: ESD and Surge Protection for USB Interfaces. *Texas Instruments*, 19.

Parra, V. D. (13 de octubre de 2020). *LOS ORÍGENES DEL PLC*. Obtenido de My Tips: <https://tinyurl.com/4fkW6mp6>

Patoux, J. (s.f.). *Ask The Applications Engineer—37: Low-Dropout Regulators*. Obtenido de Analog Devices: <https://tinyurl.com/5hm5kka>

Peterson, Z. (4 de junio de 2021). *Cumplimiento de las normas IPC para el diseño de PCB*. Obtenido de Altium: <https://tinyurl.com/2z58hf5h>

Posey, B. (2024). *Internet Industrial de las Cosas o IIoT*. Obtenido de ComputerWeekly Blog: <https://tinyurl.com/3rx8db9d>

Richtek Technology. (2014). *Selección de un regulador lineal (LDO)*. Obtenido de Richtek Technology: <https://tinyurl.com/3peprxts>

Rodríguez, L. (9 de noviembre de 2020). *¿Qué es ESD? y su importancia en la industria*. Obtenido de LinkedIn Corporation: <https://tinyurl.com/4rezh2xh>

Rohde & Schwarz. (s.f.). *¿Qué es UART?* Obtenido de Rohde & Schwarz España: <https://tinyurl.com/5e4w4t9a>

RussellH. (5 de septiembre de 2022). *Convert 0-10 V to 0-3.3 V for ADC pin and protect it*. Obtenido de Stack Exchange - Electrical Engineering: <https://tinyurl.com/4yxh3k63>

Salestarrak Deusto . (19 de enero de 2021). *ESTANDAR IPC*. Obtenido de Salesianos Deusto: <https://tinyurl.com/4jahd3b2>

SAP. (2021). *¿Qué es el Internet Industrial de las Cosas (IIoT)?* Obtenido de SAP Blog: <https://tinyurl.com/37zj57hu>

SAP. (2022). *¿Qué es la industria 4.0?* Obtenido de SAP Blog: <https://tinyurl.com/mr39etrn>

Sicma21. (14 de octubre de 2021). *SICMA21* . Obtenido de ¿Qué es un PLC y cuándo se usa?: <https://tinyurl.com/mur26fhd>

SparkFun. (s.f.). *SparkFun Serial Basic CH340C Hookup Guide*. Obtenido de SparkFun Tutorials: <https://tinyurl.com/5dvh4r4x>

Texas Instruments. (2021). Application Brief: USB-to-UART Bridge Made Simple With MSP430 MCUs. *Texas Instruments Incorporated*, 4. Obtenido de <https://tinyurl.com/yt56y4dh>

Toshiba Semiconductor. (s.f.). *TVS diode (ESD protection diode)*. Obtenido de OSHIBA ELECTRONIC DEVICES : <https://tinyurl.com/3ex9bykd>

Toshiba Semiconductor. (s.f.). *What does rail-to-rail mean (Rail-to-Rail Op amp) ?* Obtenido de Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation: <https://tinyurl.com/3kn89md7>

Tung, M. (s.f.). *What is an Optocoupler and How it Works*. Obtenido de Jameco: <https://tinyurl.com/3v62s5by>

UMW. (2020). *Datasheet: PESD3V3L1BA*. Obtenido de LCSC Electronics : <https://tinyurl.com/245vjkcx>

UMW. (2021). *Datasheet: Darlington Array Driver ULN2803A*. Obtenido de LCSC Electronics: <https://tinyurl.com/mpd2pxxc>

UMW. (2023). *Datasheet: Optocoupler EL357*. Obtenido de LCSC Electronics: <https://tinyurl.com/63htjd4n>

UMW. (2024). *Datasheet: UMW AMD117*. Obtenido de LCSC Electronics: <https://tinyurl.com/ycnj6xux>

UWM. (2023). *Datasheet: USBLC6-2SC6*. Obtenido de LCSC Electronics : <https://tinyurl.com/5akzjpxx>

WCH. (2017). *Datasheet: USB CH340*. Obtenido de LCSC Electronics: <https://tinyurl.com/3xfz3u6x>

Wikipedia . (s.f.). *Diseño electrónico*. Obtenido de <https://tinyurl.com/mrkajwex>

XLSEMI. (2023). *Datasheet: 3A 150KHz 40V Buck DC to DC Converter*. Obtenido de LCSC Electronics: <https://tinyurl.com/32k4zu3w>

YAGEO Group. (s.f.). Applications of PPTC in Circuit Protections. YAGEO. Obtenido de <https://tinyurl.com/mvav3c9m>

YONGYUTAI. (2023). *Datasheet: YLED0603YG*. Obtenido de LCSC Electronics: <https://tinyurl.com/28f8bh2c>

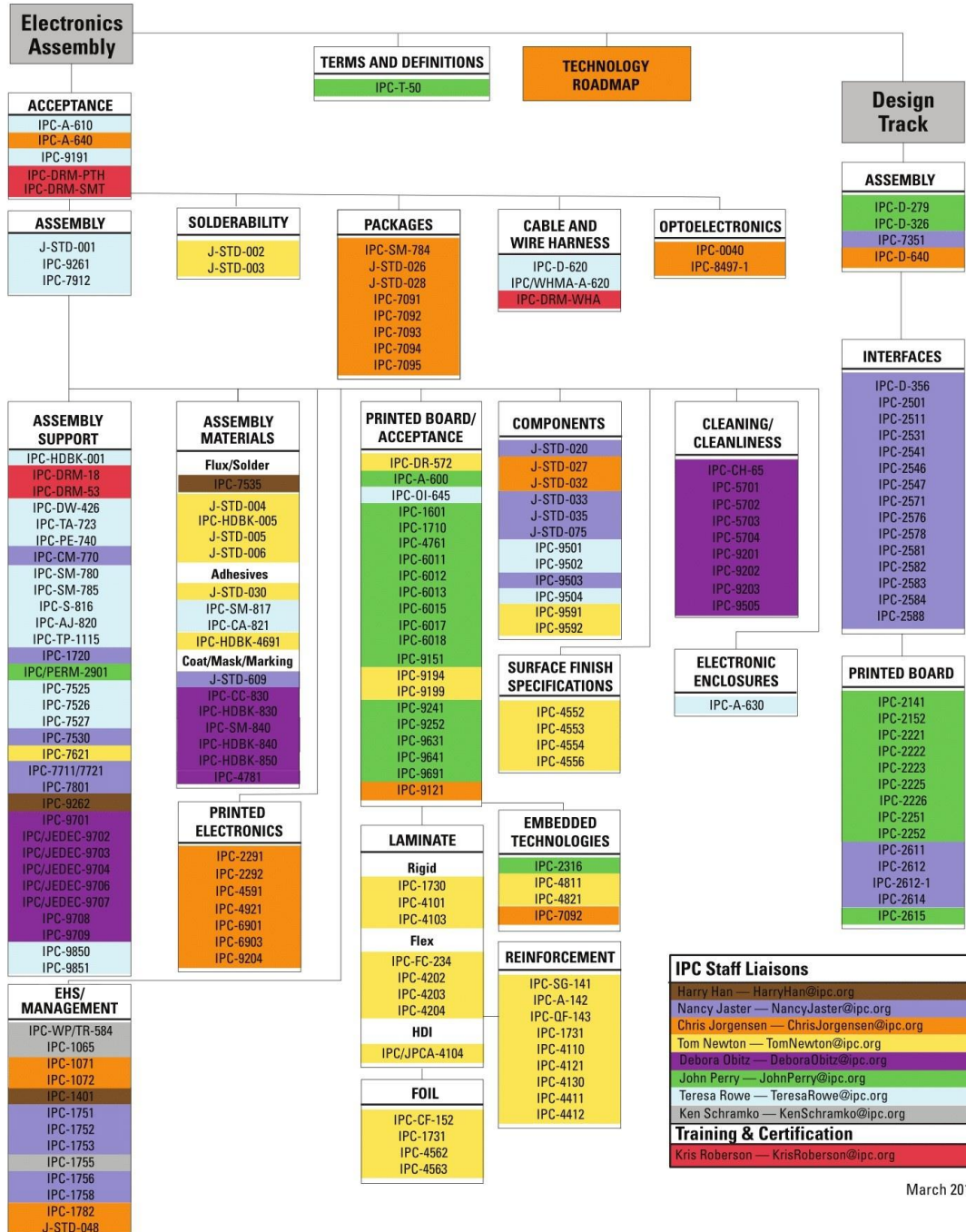
Zachariah, P. (4 de junio de 2021). *Clases IPC y cumplimiento de los estándares IPC para el diseño de PCB*. Obtenido de Altium: <https://tinyurl.com/4xw8h6rp>

Anexos

ANEXO A: Árbol de Estándares IPC



IPC Standards Tree



March 2018

For more details on these standards, visit the IPC Document Revision Table located at www.ipc.org/revisions
 IPC Headquarters • 3000 Lakeside Drive, Suite 105N., Bannockburn, IL USA • www.ipc.org

ANEXO B: Hoja de Referencia SMD

SMD REFERENCE SHEET

PASSIVE RECTANGULAR

SMD PACKAGE TYPE	DIMENSIONS MM	DIMENSIONS INCHES
01005	0.4 x 0.2	0.016 x 0.008
0201	0.6 x 0.3	0.02 x 0.01
0402	1.0 x 0.5	0.04 x 0.02
0603	1.5 x 0.8	0.06 x 0.03
0805	2.0 x 1.3	0.08 x 0.05
1008	2.5 x 2.0	0.10 x 0.08
1206	3.0 x 1.5	0.12 x 0.06
1210	3.2 x 2.5	0.125 x 0.10
1806	4.5 x 1.6	0.18 x 0.06
1812	4.6 x 3.0	0.18 x 0.125
2010	5.0 x 2.5	0.20 x 0.10
2512	6.3 x 3.2	0.25 x 0.125

SOD (SMALL OUTLINE DIODE)

SOD PACKAGE TYPE	DIMENSIONS MM
SOD-723	1.4 x 0.6 x 0.59
SOD-523	1.25 x 0.85 x 0.65
SOD-323	1.7 x 1.25 x 0.95
SOD-128	5 x 2.7 x 1.1
SOD-123	3.68 x 1.17 x 1.6
SOD-80C	3.5 x 1.5

DO-214

SOD PACKAGE TYPE	DIMENSIONS MM
DO-214AA	5.3 x 3.6 x 2.25
DO-214AB	7.95 x 5.9 x 2.25
DO-214AC	5.2 x 2.6 x 2.15

MELF (METAL ELECTRODE LEADLESS FACE)

SMD PACKAGE TYPE	DIMENSIONS MM	RATING
MicroMELF / 0102	2.2 x 1.1	0.2 - 0.3W / 150V
MiniMELF / 0204	3.6 x 1.4	0.25 - 0.4W / 200V
MELF / 0207	5.8 x 2.2	0.4 - 1W / 300V

TANTALUM CAPACITORS

SMD PACKAGE TYPE	DIMENSIONS MM
Size A	3.3 x 1.6 x 1.6
Size B	3.5 x 2.8 x 1.9
Size C	6.0 x 3.2 x 2.2
Size D	7.3 x 4.3 x 2.4
Size E	7.3 x 4.3 x 4.1

ALUMINIUM CAPACITORS

SMD PACKAGE TYPE	DIMENSIONS MM
------------------	---------------

Size A

Size B

Size C

Size D

Size E / F

Size G

SOT-23

SOT-223

TO-252

TO-263

SOT

TSSOP8

SSOP8

SOP8

3.8 x 4.8

3.1 x 4.5

2.9 x 3.15

6.5 x 5.6

QFN32

32 TQFP

5.0 x 5.0

7.0 x 7.0

PCB TRACK WIDTH

MILS	TRACE WIDTH
6	
8	
10	
12	
14	
16	
18	
20	
24	
30	
40	
60	

HOLES DIAMETER

Ø MM	WIRE SIZE	AMPERE
2.59	55	
1.45	28	
0.81	11	
0.45	2.7	
0.32	1.4	
0.25	0.86	

PCB VIA'S

15	18	20	22	24	30
2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54
2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

PITCH REFERENCE

STUDIOPIETERS®
HTTPS://WWW.STUDIOPIETERS.NL
VERSION 1.0.3
RELEASE DATE: 05/04/2021
MIT LICENSE

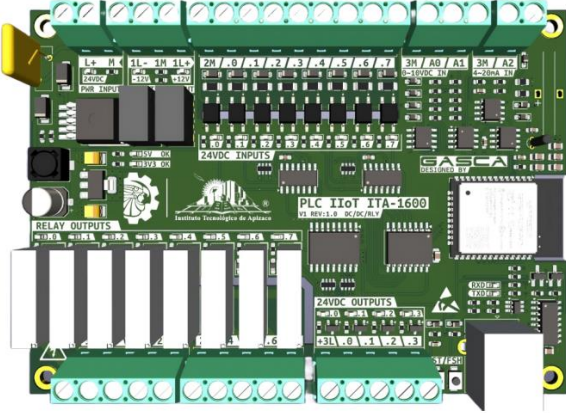
ANEXO C: Diagrama Esquemático Completo

PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER (PLC) WITH WIRELESS COMMUNICATION FOR INDUSTRY 4.0 APPLICATIONS

E947038 REVISION 1.0

RELEASED 10-APR-2024

PAGE	INDEX
1	COVER PAGE
2	BLOCK DIAGRAM
3	HIERARCHICAL SCHEMATIC
4	DIGITAL INPUTS
5	ANALOG INPUTS
6	4-20mA INPUTS
7	ESP32-WROOM-H4
8	USB-UART
9	REAL TIME CLOCK (RTC)
10	RELAY OUTPUTS
11	TRANSISTOR OUTPUTS
12	POWER SUPPLY
13	MECHANICAL DOC
14	REVISION HISTORY



DESIGN CONSIDERATIONS

DESIGN NOTE:
Example text for informational design notes.

DESIGN NOTE:
Example text for cautionary design notes.

DESIGN NOTE:
Example text for debug notes.

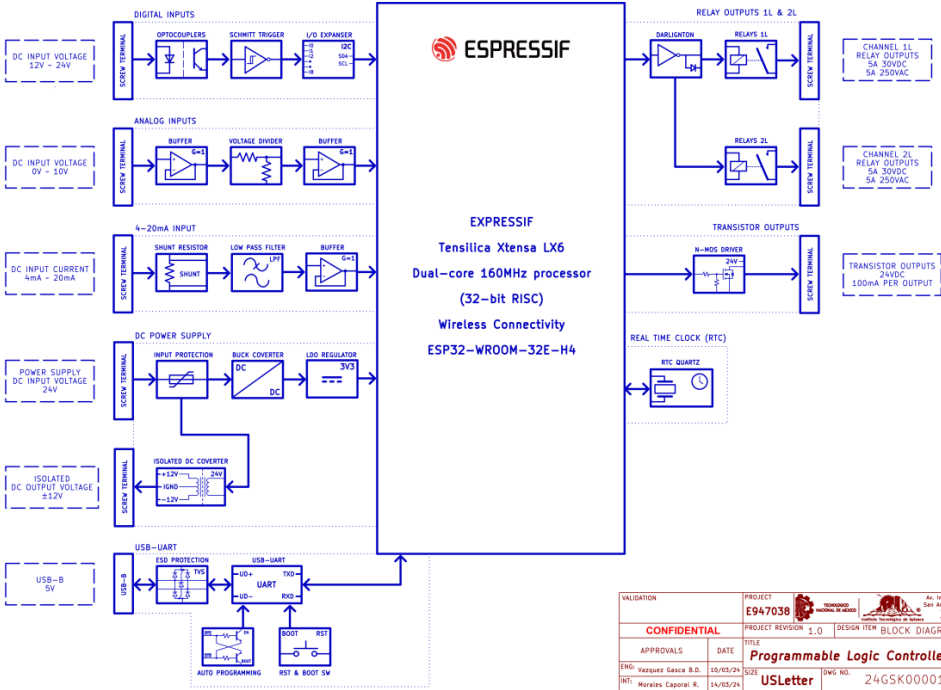
DESIGN NOTE:
Example text for critical design notes.

LAYOUT NOTE:
Example text for critical layout guidelines.

DEVELOPED BY:
– Dr. Roberto Morales Caporal
– Brayan Daniel Vazquez Gasca

VALIDATION	2024-03-29	PROJECT	E947038	DESIGN ITEM	Root
CONFIDENTIAL		PROJECT REVISION	1.0	DESIGN ITEM	Root
APPROVALS	DATE	TITLE	Programmable Logic Controller PLC IloT		
ENG: Vazquez Gasca B.D.	10/03/24	SIZE	Dwg No.: 24GSK00001278		
INT: Morales Caporal R.	14/03/24	USLetter	REV: 1.0		
EXT: Bueno Azeite C.	12/04/24	SCALE	1:1	FILE NAME	E947038.kicad_sch
					SHEET: 1/14

BLOCK DIAGRAM



VALIDATION	2024-03-29	PROJECT	E947038	DESIGN ITEM	Root
CONFIDENTIAL		PROJECT REVISION	1.0	DESIGN ITEM	Root
APPROVALS	DATE	TITLE	Programmable Logic Controller PLC IloT		
ENG: Vazquez Gasca B.D.	10/03/24	SIZE	Dwg No.: 24GSK00001279		
INT: Morales Caporal R.	14/03/24	USLetter	REV: 1.0		
EXT: Bueno Azeite C.	12/04/24	SCALE	1:1	FILE NAME	E947038_BD.kicad_sch
					SHEET: 2/14

166

ANALOG INPUTS

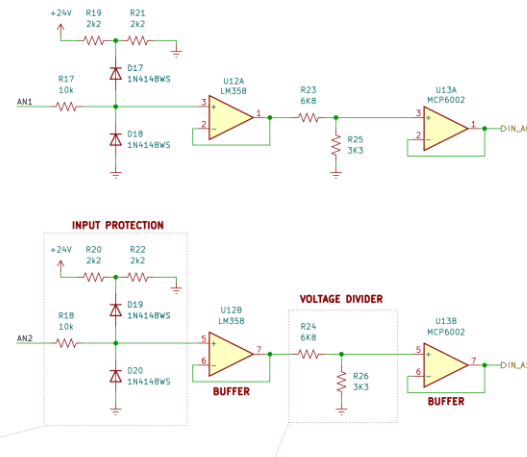
Screw Terminal



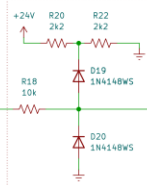
DESIGN NOTE:
The inputs admit an analog voltage of 0-10V DC, with a maximum frequency of 10kHz.

DESIGN NOTE:
The analog inputs share the same GND of the logic circuit.

Signal Conditioner 0-10V to 0-3V3



INPUT PROTECTION



DESIGN NOTE:
To convert the signal from 0-10V to 0-3V3, a resistive voltage divider is used. A clamping diode was placed to protect the input of the op amp in case of failure of the previous protection.

Power Supply OpAmps



VALIDATION	2024-03-29	PROJECT	E947038	PROJECT REVISION	1.0	DESIGN ITEM	ANALOG INPUTS
CONFIDENTIAL		TITLE	Programmable Logic Controller PLC I/O	DATE	15/03/24	SIZE	USLetter
APPROVALS		ENG	Vazquez Gascia B.D.	15/03/24	EXT	Bueno Avelardo C.	12/04/24
INT	Morales Caporal R.	15/03/24	EXT	Bueno Avelardo C.	12/04/24	SCALE	1:1
FILE NAME	E947038_AI.kicad_sch	REV	1.0	SHEET	5/14		

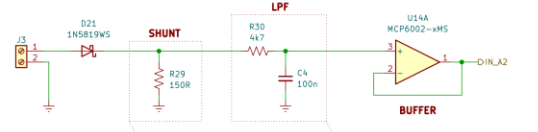
4-20mA INPUTS

DESIGN NOTE:
Be careful with the polarity of the input signal, the input is protected but it will not send any signal to the MCU.

LAYOUT NOTE:
Place a polarity warning symbol on the silkscreen.

DESIGN NOTE:
The analog inputs share the same GND of the logic circuit.

Shunt Resistor with LPF



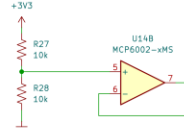
DESIGN NOTE:
The 150 ohm shunt resistor is specifically selected to measure 4-20 mA current loop. When the current is 4mA, the output voltage is 0.6V. When the current is 20mA the voltage will be 3V.

DESIGN NOTE:
Passive first-order low-pass filter, with 340Hz cutoff frequency. Filter to avoid noise and interference from the industrial environment.

Power Supply



Unused OpAmp



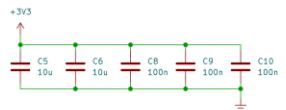
DESIGN NOTE:
Proper Implementation of Unused OpAmp with Single Supply Rail.
Unused op amps in multi-channel devices must be configured properly to avoid possible device degradation, extra power consumption and noise.
The second unused operational of the MCP6002 is configured as a voltage follower using a resistive divider on the non-inverting input.

VALIDATION	2024-03-29	PROJECT	E947038	PROJECT REVISION	1.0	DESIGN ITEM	4-20 INPUTS
CONFIDENTIAL		TITLE	Programmable Logic Controller PLC I/O	DATE	15/03/24	SIZE	USLetter
APPROVALS		ENG	Vazquez Gascia B.D.	15/03/24	EXT	Bueno Avelardo C.	12/04/24
INT	Morales Caporal R.	15/03/24	EXT	Bueno Avelardo C.	12/04/24	SCALE	1:1
FILE NAME	E947038_420.kicad_sch	REV	1.0	SHEET	6/14		

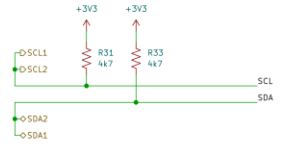
ESP32-WROOM-32E-H4

GPIO0, GPIO2, GPIO12 (MTD) and GPIO15 (MTD)

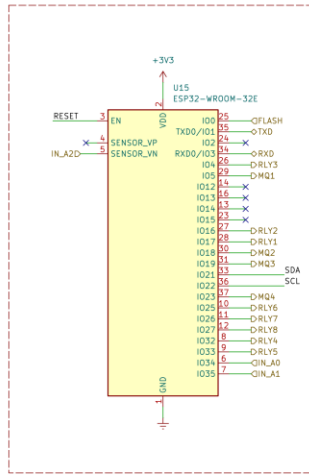
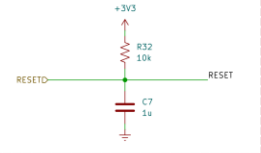
Decoupling Capacitor Bank



I2C PULL-UP



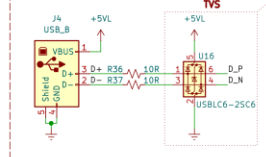
Power-On Reset (POR)



VALIDATION	PROJECT	E947038	CONFIDENTIAL	DESIGN ITEM	ESP32-WROOM
APPROVALS	DATE	18/03/24	1.0	1.0	1.0
ENG: Vazquez Gencé B.D.	DATE	18/03/24	1.0	1.0	1.0
INT: Morales Caporal R.	DATE	18/03/24	1.0	1.0	1.0
EXT: Bueno Arendato C.	DATE	18/03/24	1.0	1.0	1.0
SCALE	1:1	FILE NAME	E947038_ESP.kicad_sch	SHEET	7/14

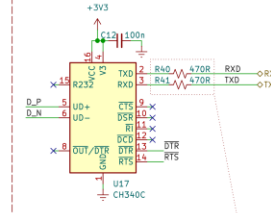
USB-UART

USB-B with ESD Protection



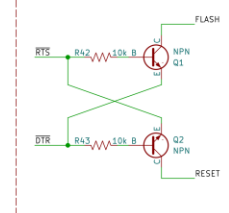
DESIGN NOTE:
The USB D+ and D- data bus input is protected with a transient voltage suppressor (TVS) diode for protection against electrostatic discharge up to 15 kV (air discharge), and 8 kV (contact discharge).

CH340C UART



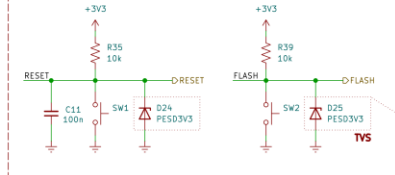
DESIGN NOTE:
The Transmitt (TX) and Receive pins have a series protection resistor for protection in case a firmware error, the pins designated as TX and RX on the ESP32 are used as I/O.

AUTOPROG



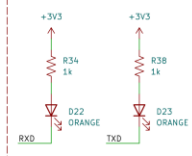
DESIGN NOTE:
The USB-UART block has an automatic programming circuit (AUTOPROG). It's not necessary to press any reset or boot button during firmware upload to the ESP32 microcontroller.

Flash & Reset button



DESIGN NOTE:
Each user-accessible pushbutton has a bi-directional TVS diode for protection against electrostatic discharge up to 30 kV.

LED Indicator RX & TX



DESIGN NOTE:
The TX and RX pins of the system have LED indicators for debugging communication errors.

VALIDATION	PROJECT	E947038	CONFIDENTIAL	DESIGN ITEM	USB-UART
APPROVALS	DATE	18/03/24	1.0	1.0	1.0
ENG: Vazquez Gencé B.D.	DATE	18/03/24	1.0	1.0	1.0
INT: Morales Caporal R.	DATE	18/03/24	1.0	1.0	1.0
EXT: Bueno Arendato C.	DATE	18/03/24	1.0	1.0	1.0
SCALE	1:1	FILE NAME	E947038_USB.kicad_sch	SHEET	8/14

REAL TIME CLOCK (RTC)

RTC DS1307 with Supercapacitor Backup

DESIGN NOTE:
The supercapacitor has a charging circuit, when the power is connected for the first time the supercapacitor will charge according to the RC constant in 12 minutes, once charged the supercapacitor can maintain a charge towards VBAT of the DS1307 for approximately 15 days without power supply.

LAYOUT NOTE:
Place polarity marks on the silkscreen

DESIGN NOTE:
I2C address for the DS1307 slave in this block is assigned 0x68 for programming.

VALIDATION	PROJECT		E947038		REVISIÓN 1.0		INSTITUTO TECNOLÓGICO DE GUATEMALA		Av. Instituto Tecnológico No. 418 Carr. Antigua-Huehuetenango, Tzucuba, Tzucuba, Guatemala, C.A. 06001 Tel.: 241-657-2058 (Ext. 658)	
	CONFIDENTIAL		PROJECT REVISION		1.0		DESIGN ITEM		REAL TIME CLOCK (RTC)	
APPROVALS		DATE		TITLE		E947038		24GSK00001286		
ENG: Vazquez Garcia B.D.		16/03/24		REV		1.0		1.0		
INT: Morales Caporal R.		16/03/24		FILE NAME		E947038_RTC.kicad_sch		SHEET: 9/14		
EXT: Bueno Arevalo C.		12/04/24		SCALE		1:1				

Programmable Logic Controller PLC IloT

USLetter

24GSK00001286

E947038_RTC.kicad_sch

SHEET: 9/14

RELAY OUTPUTS

Darlington Driver

DESIGN NOTE:
The ULN2803 Darlington driver is capable of driving inductive loads such as relays, it has base and pull-down resistors internally within the IC, making it suitable for directly connecting the outputs of the ESP32 to the ULN2803.

DESIGN NOTE:
The relay outputs support a maximum of 250VAC @5A or 30VDC @5A.

LAYOUT NOTE:
For the section of relay driver don't add power planes. Under each relay leave an isolation slot for a creepage distance between the inputs and outputs.

Relay Outputs

LAYOUT NOTE:
In the screw terminal block leave a separation to distinguish block 1L and 2L.

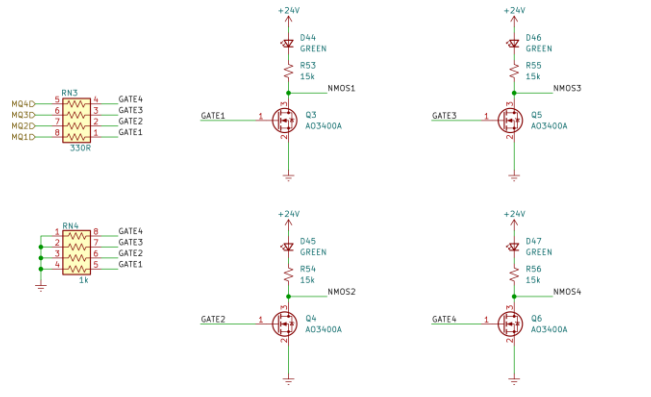
DESIGN NOTE:
1L and 2L are electrically isolated, as well as the 4 relays of each block.

Screw Terminal

VALIDATION	PROJECT	CONFIDENTIAL	Ac. Instituto Tecnológico de Celaya
	E947038		San Andrés Batastón, Tlaxiaco, Tlaxiaco, México, C.P. 40400
	PROJECT REVISION: 1.0	DESIGN ITEM: RELAY OUTPUTS	Tel: 255-257-2028
		TITLE	
APPROVALS	DATE	SIZE	24GSK00001287
ENG: Vazquez Gascón B.D.	10/05/24		
INT: Noriega Caporal R.	10/05/24	USLetter	
EXT: Buenos Ayres C.	10/05/24	SCALE: 1:1	FILE NAME: E947038_RLY.icad.sch
			SHEET: 10/14

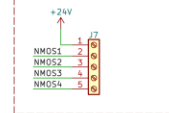
TRANSISTOR OUTPUTS

N-MOS Sinking Outputs



DESIGN NOTE:
The transistor output supplies 24VDC from the main power source, with a maximum current of 50mA per channel in sinking mode.

Screw Terminal

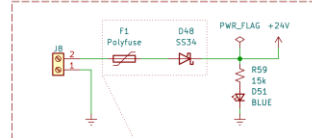


DESIGN NOTE:
The transistor output block has the only function to be used with 24VDC industrial tower light indicator, not to be used with other devices.

VALIDATION	PROJECT	E947038	San Instituto Tecnológico No. 428 San Andrés Bolognini, Toluca, Toluca, México, C.P. 50000 Tel. 245-467-2000 Ext.850
CONFIDENTIAL	PROJECT REVISION	1.0	DESIGN ITEM TRANSISTOR OUTPUTS
APPROVALS	DATE	16/03/24	16/03/24
ENG: Vazquez Gascó B.D.	SIZE	USLetter	ENG NO. 24GSK00001288
INT: Morales Caporal R.	SCALE	1:1	REV. 1.0
EXT: Bueno Arendado C.	FILE NAME	E947038_MOS.kicad_sch	SHEET 11/14

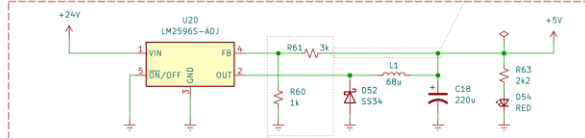
POWER SUPPLY

Input Protection 24V



DESIGN NOTE:
The power input has reverse polarity protection and a 30 VDC self-resetting (PPTC) fuse.

DC-DC Buck Converter 24V to 5V

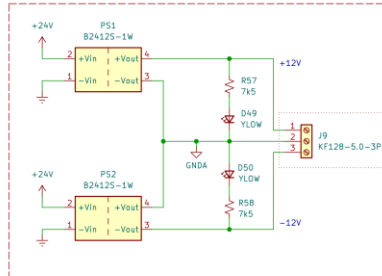


LAYOUT NOTE:
Keep feedback wiring away from inductor flux.

LAYOUT NOTE:
Locate the programming resistors near the feedback pin using short leads.

LAYOUT NOTE:
Heavy lines must be kept short and use ground plane construction for best results.

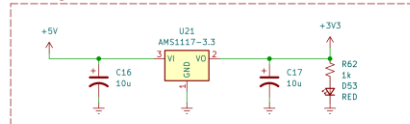
DC-DC Isolated Converter 24V to ±12V



DESIGN NOTE:
The PLC device has an output galvanically isolated from the entire main power supply, this output was designed to operate with current sensors such as the LEM LA 100-P/SP13.

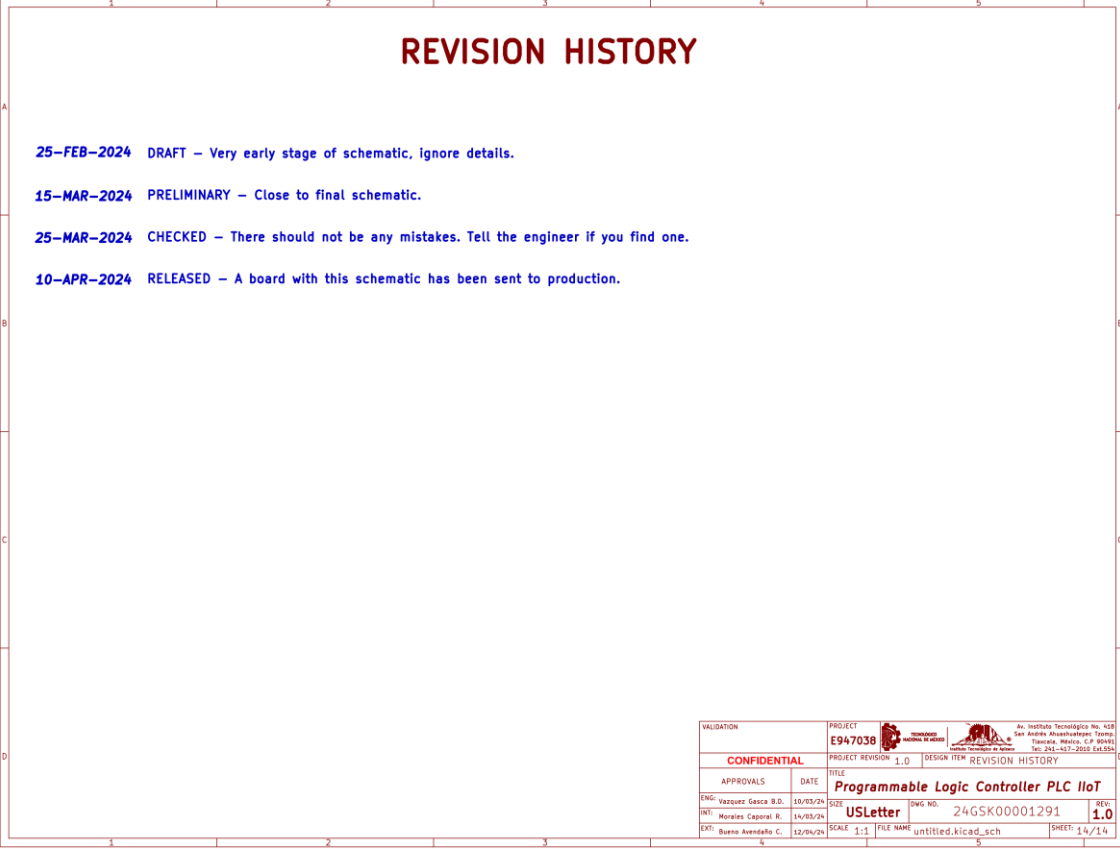
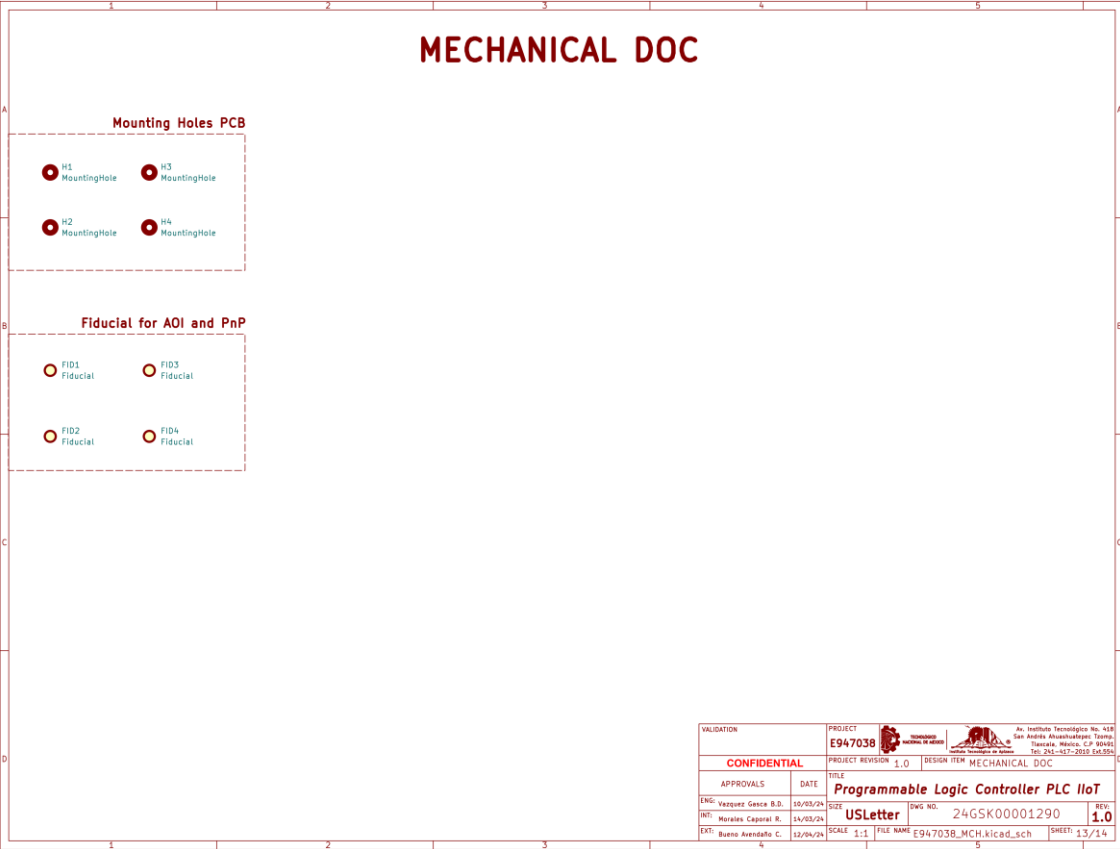
DESIGN NOTE:
The output is only capable of a maximum current of 80 mA at ±12VDC.

LDO Regulator 3V3



DESIGN NOTE:
Power for the 3V3 logic circuit is provided by an LDO linear regulator to provide further filtering of electrical noise from the environment and the DC/DC converter.

VALIDATION	PROJECT	E947038	San Instituto Tecnológico No. 428 San Andrés Bolognini, Toluca, Toluca, México, C.P. 50000 Tel. 245-467-2000 Ext.850
CONFIDENTIAL	PROJECT REVISION	1.0	DESIGN ITEM POWER SUPPLY
APPROVALS	DATE	16/03/24	16/03/24
ENG: Vazquez Gascó B.D.	SIZE	USLetter	ENG NO. 24GSK00001289
INT: Morales Caporal R.	SCALE	1:1	REV. 1.0
EXT: Bueno Arendado C.	FILE NAME	E947038_PWR.kicad_sch	SHEET 12/14



ANEXO D: Hoja de Datos PLC IIoT ITA-1600



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC) IIoT

ITA-1600

HOJA DE DATOS



Fecha	Revisión	Cambios
31/05/2024	1.0	Versión inicial

© Roberto Morales Caporal 2024.

© Brayan Daniel Vazquez Gasca 2024.

Todos los derechos reservados. Este documento es propiedad de los autores y del Instituto Tecnológico de Apizaco. Queda prohibida su reproducción total o parcial sin el permiso previo por escrito de los autores y de la institución, a menos que el propósito del uso sea académico, con fines de investigación no comercial o de uso educativo, y se otorgue los créditos completos a los autores e institución como titulares de los derechos de autor.

Hoja de Datos PLC IIoT ITA-1600
Revisión 1 – 31 de mayo de 2024

Índice

1. Introducción 4

2. Diagrama de Bloques 5

3. Características Técnicas 6

4. Partes de Conexión del PLC 8

5. Descripción de Terminales..... 9

6. Descripción de Indicadores LED 10

7. Instalación 14

8. Configuración Inicial 14

1. Introducción

Bienvenido al manual de usuario del Controlador Lógico Programable (PLC) IIoT ITA-1600. Este documento está diseñado para proporcionar una guía completa sobre la instalación, configuración, y operación de su PLC, asegurando un uso eficiente y seguro del dispositivo.

- **Sobre el PLC IIoT ITA-1600**

El PLC IIoT ITA-1600 es un dispositivo avanzado diseñado para aplicaciones industriales en el contexto de la Industria 4.0. Equipado con capacidades de conectividad inalámbrica y una robusta arquitectura de control, el ITA-1600 permite la supervisión y control de procesos industriales de manera eficiente y flexible. Este dispositivo integra las funciones esenciales de un PLC tradicional con características adicionales que facilitan su integración en sistemas modernos de automatización y control.

- **Características Principales**

-Entradas y Salidas Digitales y Analógicas: El ITA-1600 cuenta con múltiples entradas y salidas, tanto digitales como analógicas, para una versatilidad máxima en la gestión de señales y control de dispositivos.

-Conectividad Inalámbrica: Incluye módulos de conectividad Wi-Fi y Bluetooth, permitiendo una comunicación eficiente y sin cables con otros dispositivos y sistemas de control.

-Montaje y Diseño Compacto: Diseñado para montaje en carril DIN, el ITA-1600 facilita su integración en paneles de control industriales, optimizando el espacio y simplificando la instalación.

-Alta Confiabilidad: Con protecciones integradas contra sobrecargas y polaridad inversa, el ITA-1600 garantiza un funcionamiento seguro y duradero en entornos industriales exigentes.

2. Diagrama de Bloques

El diagrama de bloques proporciona una visión general de la arquitectura y las interconexiones principales del PLC IIoT ITA-1600. Este diagrama ilustra cómo se integran los diferentes componentes y módulos del sistema para cumplir con las funciones específicas de control y comunicación. A continuación, se presenta el diagrama de bloques en la figura 1.

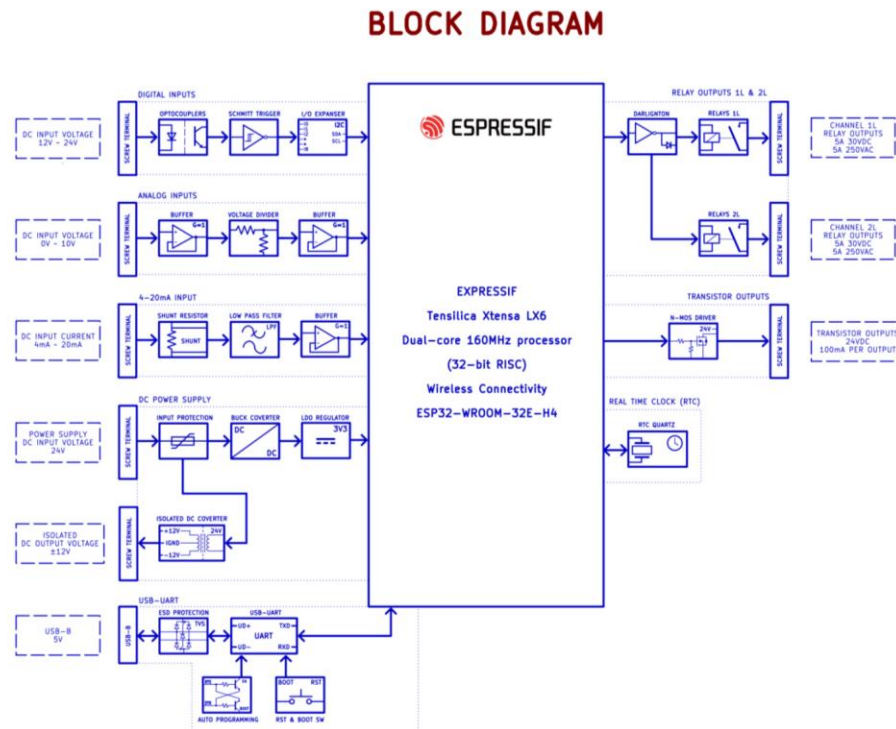


Figura 1: Diagrama de Bloques Completo del PLC IIoT.

3. Características Técnicas

Display	
Con display	No
Indicadores LED	Si
Diseño/Montaje	
Montaje	Sobre perfil normalizado de 35 mm DIN
Voltaje de Alimentación	
Voltaje nominal (DC)	
• 12 V	No
• 24 V	Si
Rango admisible, límite inferior (DC)	22 V
Rango admisible, límite superior (DC)	25 V
Protección de polaridad inversa	Si
Hora	
Respaldo de hora (sin energía principal)	48 Horas
Entradas Digitales	
Nº de Entradas digitales	8
Voltaje de entrada (DC)	12 V ~ 24 V
Frecuencia máxima de operación	1 kHz
Separación galvánica	Si, 3 750 VRMS de aislamiento
Intensidad de entrada para	
• Señal 0	0 mA @0 V
• Señal 1	10.91 mA @24 VDC
Tiempo de retardo	
• Señal 0 a 1	< 1 ms
• Señal 1 a 0	< 1ms
Longitud de conductor sin apantallar	100 m
Entradas Analógicas de 0 V a 10 V	
Nº de Entradas analógicas	2
Rango	0 ... 10 V DC
Impedancia de entrada	> 1 MΩ
Protección de polaridad inversa y sobrevoltaje	Si, 24 V DC máx.
Separación galvánica	No
Longitud de conductor trenzado y apantallado	10 m
Entradas Analógicas de 4 mA a 20 mA	
Nº de Entradas analógicas	1
Rango	4 ... 20 mA DC
Impedancia de entrada	150 Ω
Protección de polaridad inversa	Si
Separación galvánica	No
Longitud de conductor trenzado y apantallado	10 m

6

Salidas a Relevador	
Nº de Salidas a relevador	8
En grupos de	4
Separación galvánica	Si
Voltaje de operación por relevador	
• 250 VAC	5 A AC
• 30 VDC	5 A DC
Frecuencia máxima mecánica	10 Hz
Resistencia mecánica	20 000 000 de operaciones
	50 000 (3A 250VAC/30VDC) carga resistiva 1s on 9s off
Resistencia eléctrica	off
Salidas Digitales	
Nº de Salidas digitales	3
En grupos de	1
Separación galvánica	No
Tipo de salida	Transistor N-MOS conexión N
Voltaje de operación por transistor	
• 24 VDC	100 mA por transistor
Protección contra cortocircuito y sobrecarga	No
Frecuencia máxima eléctrica	1 kHz
Conectividad y CPU	
Bluetooth	• Bluetooth V4.2 BR/EDR and Bluetooth LE specification • Class-1, class-2 and class-3 transmitter • AFH • CVSD and SBC
Wi-Fi	• 802.11b/g/n • Bit rate: 802.11n up to 150 Mbps • A-MPDU and A-MSDU aggregation • 0.4 µs guard interval support • Center frequency range of operating channel: 2412 ~ 2484 MHz
CPU y Memoria interna	• ESP32-D0WD-V3 or ESP32-D0WDR2-V3 embedded, Xtensa dual-core 32-bit LX6 microprocessor, up to 240 MHz • 448 KB ROM • 520 KB SRAM • 16 KB SRAM in RTC • ESP32-D0WDR2-V3 also provides 2 MB PSRAM
Condiciones ambientales	
Temperatura ambiente en servicio	20 °C (sin condensación) a 55 °C
Temperatura ambiente en almacenaje	40 °C a 70 °C

4. Partes de Conexión del PLC

El PLC IIoT ITA-1600 dispone de múltiples entradas y salidas para su aplicación en diferentes entornos industriales y de automatización. A continuación, en la figura 2, se presenta la descripción de cada bloque de terminales, que se pueden distinguir fácilmente por la separación entre cada bloque.

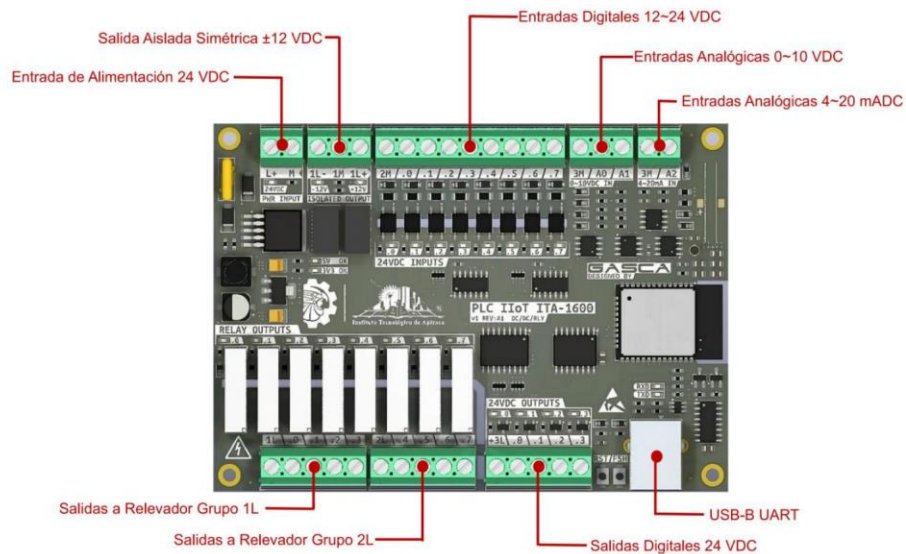


Figura 2: Descripción de bloques de terminales del PLC.

La placa del PLC está diseñada para incluir solo la información esencial en la serigrafía, facilitando su correcto uso. Cada bloque de terminales está claramente señalizado con el número de terminal asignado a cada bloque. Por ejemplo, la entrada de alimentación está marcada para indicar claramente la polaridad, señalizando cuál es la entrada positiva (L+) y el común (GND, marcado como M).

5. Descripción de Terminales

El ITA-1600 tiene impresa serigrafía en la placa que indica cada terminal en el PLC disponible para conectar. A continuación, se lista la descripción de cada terminal, así como su conexión interna hacia el CPU.

BLOQUE	TERMINAL	DESCRIPCIÓN	GPIO ESP32
Alimentación	L+	Entrada positiva de 24 VDC	
	M	Entrada negativa (GND)	
	1L-	Salida negativa aislada -12 VDC	
	1M	Salida aislada GND flotante	
	1L+	Salida positiva aislada +12 VDC	
Entradas Digitales	2M	GND de entradas digitales	
	.0	Entrada digital .0	I2C
	.1	Entrada digital .1	I2C
	.2	Entrada digital .2	I2C
	.3	Entrada digital .3	I2C
	.4	Entrada digital .4	I2C
	.5	Entrada digital .5	I2C
	.6	Entrada digital .6	I2C
Entradas Analógicas	.7	Entrada digital .7	I2C
	3M	GND de entradas analógicas	
	A0	Entrada analógica A0	GPIO 34
	A1	Entrada analógica A1	GPIO 35
Salidas a Relevador	A2	Entrada analógica A2	GPIO 39
	1L	Conexión común grupo 1L	
	.0	Salida relevador .0 de grupo 1L	GPIO 17
	.1	Salida relevador .1 de grupo 1L	GPIO 16
	.2	Salida relevador .2 de grupo 1L	GPIO 04
	.3	Salida relevador .3 de grupo 1L	GPIO 32
	2L	Conexión común grupo 2L	
	.4	Salida relevador .4 de grupo 2L	GPIO 33
	.5	Salida relevador .5 de grupo 2L	GPIO 25
	.6	Salida relevador .6 de grupo 2L	GPIO 26
Salidas Digitales	.7	Salida relevador .7 de grupo 2L	GPIO 27
	+3L	Conexión común +24 VDC	
	.0	Conexión salida modo drenador .0	GPIO 05
	.1	Conexión salida modo drenador .1	GPIO 18
	.2	Conexión salida modo drenador .2	GPIO 19
	.3	Conexión salida modo drenador .3	GPIO 23

Las entradas digitales están conectadas a un expansor de E/S con número de parte PCF8574, configurado con la dirección I2C 0x20. El reloj en tiempo real (RTC) utiliza la dirección I2C 0x68.

6. Descripción de Indicadores LED

El PLC IIoT ITA-1600 está equipado con indicadores LED que proporcionan información visual sobre el estado de las entradas y el funcionamiento del sistema. Estos LEDs permiten verificar rápidamente si una entrada está recibiendo una señal y si el voltaje en la placa es correcto. A continuación, se detalla la función de cada uno de estos indicadores.

- **Fuente de Alimentación:**

La sección de la fuente de alimentación del ITA-1600 cuenta con varios indicadores LED que permiten verificar el correcto funcionamiento del sistema de alimentación. A continuación, se detalla la función de cada uno de estos LED:

-LED Azul (24 VDC): Este LED se enciende para indicar que la alimentación de 24 VDC está siendo recibida correctamente y que la polaridad es adecuada. Si este LED no está encendido, podría indicar un problema con la fuente de alimentación externa o una conexión incorrecta.

-LEDs Amarillos (+12 VDC y -12 VDC): Hay dos LEDs amarillos que indican el estado de las salidas aisladas de voltaje simétrico. Uno de ellos indica la salida de +12 VDC y el otro la salida de -12 VDC. Estos LEDs se encienden cuando los voltajes respectivos están presentes y correctos. Cada LED está etiquetado con la serigrafía correspondiente para facilitar su identificación.

-LEDs Rojos (5 VDC y 3.3 VDC): Estos LEDs rojos señalan que los voltajes de nivel lógico internos del PLC están funcionando correctamente. Uno de los LEDs indica la presencia de 5 VDC y el otro de 3.3 VDC. Estos voltajes son críticos para el funcionamiento interno del PLC, y la ausencia de cualquiera de estos LEDs durante la operación normal sugiere un problema en la etapa de alimentación o un estado anormal de funcionamiento.

En condiciones normales de operación, todos estos LEDs deben estar encendidos. La ausencia de iluminación en cualquiera de estos indicadores señala un posible

fallo en la etapa de alimentación que debe ser investigado para asegurar el correcto funcionamiento del PLC.

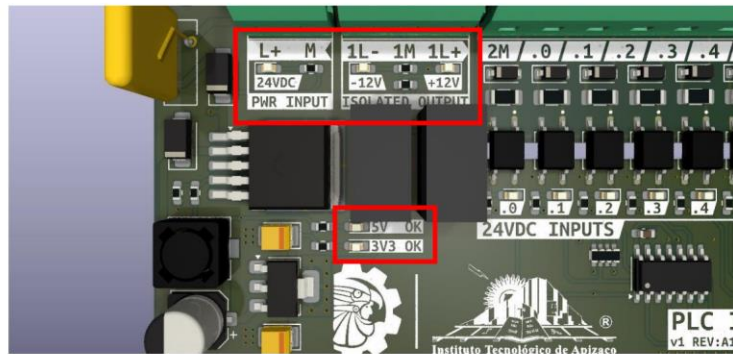


Figura 3: Señalamiento de LED's indicadores en placa del PLC.

- **Entradas Digitales:**

Cada una de las ocho entradas digitales cuenta con un LED verde que se enciende cuando una señal está presente en esa entrada. Estos LEDs permiten una rápida verificación visual de la actividad de las entradas digitales. Cuando un LED está encendido, indica que la entrada asociada está recibiendo una señal. La serigrafía en la placa junto a cada LED ayuda a identificar la entrada que está activa

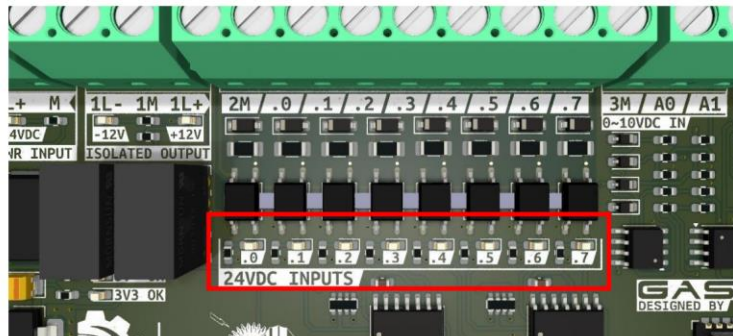


Figura 4: Señalamiento de LED's indicadores de entradas digitales.

- **Salidas a Relevador:**

Las salidas a relevador del PLC están equipadas con indicadores LED verdes que se iluminan para indicar el estado operativo de cada relevador. Estos LEDs proporcionan una retroalimentación visual instantánea sobre qué relevadores están activos en un momento dado. La serigrafía de la placa del PLC identifica claramente cada LED asociado con su salida a relevador respectiva.

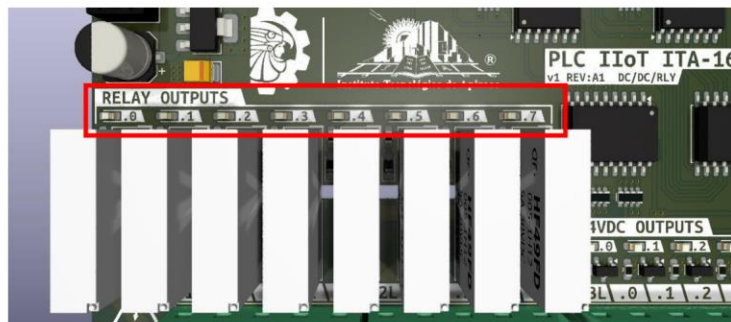


Figura 5: Señalamiento de LED's indicadores de salidas a relevador.

- **Salidas Digitales:**

Las salidas digitales del PLC están equipadas con cuatro LEDs individuales que indican el estado de activación de cada salida. Cada LED color verde se ilumina para mostrar visualmente cuándo una salida específica está activa.

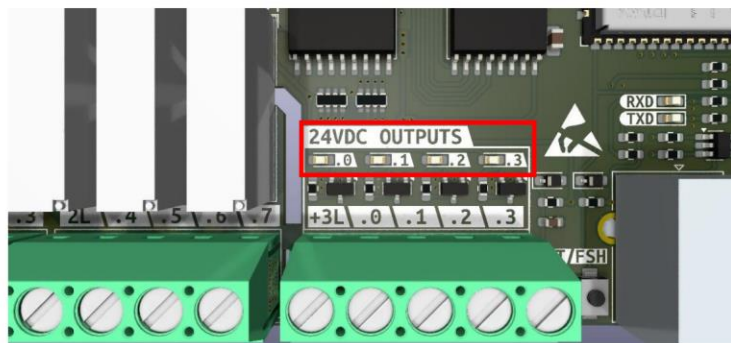


Figura 6: Señalamiento de LED's indicadores de salidas a relevador.

- **Transmisión y Recepción de Datos por USB:**

El PLC está equipado con dos LEDs amarillos que indican la transmisión (TXD) y recepción (RXD) de datos exitosa entre el PLC y dispositivos periféricos o la computadora a través de USB. Estos LEDs proporcionan una clara retroalimentación visual sobre el estado de la comunicación USB.

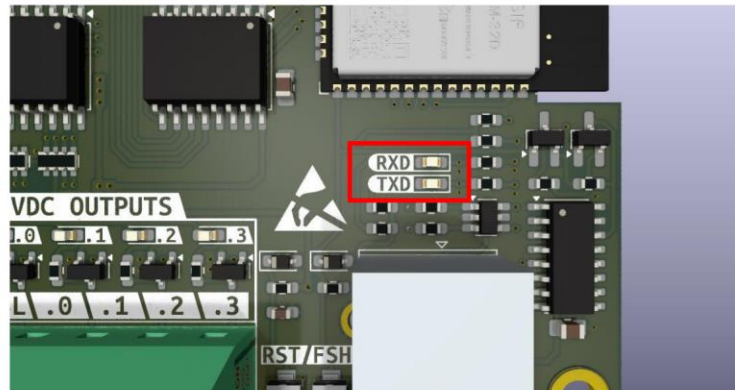


Figura 7: Señalamiento de LED's indicadores de transmisión y recepción en USB.