

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Mecatrónica



## **Diseño de un sistema para la detección automática de anomalías en PCBs de la empresa Gener8**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de  
Ingeniera Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

Sofía del Carmen Valverde Gutiérrez

Cartago, 20 de noviembre de 2024





Esta obra está bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International.



Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Sofía del Carmen Valverde Gutiérrez

Cartago, 19 de noviembre de 2024

Céd: 3-0498-0737



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

El profesor asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito final para aprobar el curso Proyecto Final de Graduación y optar así por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: Sofia del Carmen Valverde Gutiérrez

Proyecto: Diseño de un sistema para la detección automática de anomalías en PCBs de la empresa Gener8.

**CARLOS ADRIAN SALAZAR GARCIA (FIRMA)**  
Firmado digitalmente por CARLOS ADRIAN SALAZAR GARCIA (FIRMA)  
Fecha: 2024.11.18 15:15:29 -06'00'

---

Dr. -Ing. Carlos Adrián Salazar García

Asesor

Cartago, 19 de noviembre 2024



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

Proyecto final de graduación defendido ante el presente jurado evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, según lo establecido por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Sofía del Carmen Valverde Gutiérrez

Proyecto: Diseño de un sistema para la detección automática de anomalías en PCBs de la empresa Gener8.

Miembros del jurado evaluador

Firmado digitalmente por EDUARDO JOSE  
ASENJO CASTILLO (FIRMA)  
Fecha: 2024.11.19 09:43:59 -06'00'

ANA MARIA MURILLO MORGAN (FIRMA)  
PERSONA FISICA, CPF-01-1587-0893.  
Fecha declarada: 19/11/2024 09:40:54 AM  
Esta es una representación gráfica únicamente,  
verifique la validez de la firma.

---

Ing. Eduardo José Asenjo Castillo

Jurado

---

Ing. Ana María Murillo Morgan

Jurado

Los miembros de este jurado dan fe de que el presente proyecto final de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 19 de noviembre 2024



# Resumen

La producción de placas de circuito impreso (PCBs) en la empresa Gener8 se ve comprometida por deficiencias en la detección de anomalías. Actualmente, el proceso de inspección de las tarjetas se realiza de manera manual por un operario, lo que ha dado lugar a fallos en la identificación de problemas como bolas de soldadura, puentes de soldadura y pines torcidos. Estas deficiencias impactan negativamente en el flujo de producción, aumentando la cantidad de retrabajos, causando pausas en las labores y dañando tanto las tarjetas como los equipos de prueba.

Para abordar esta problemática, se propone el diseño de un sistema de detección automática de anomalías en las PCBs. Para llevar a cabo este proyecto, se adoptó una metodología de diseño y desarrollo de productos que prioriza la creación de una solución que satisfaga las necesidades del cliente.

Se desarrolló una estructura de montaje y captura de imágenes que aísla la PCB en inspección del entorno, mejorando así la calidad de la imagen obtenida. Esta estructura incluye soportes para la iluminación, la cámara y la PCB, asegurando el cumplimiento de los requerimientos ópticos necesarios para capturar con claridad todo el campo de visión.

Para la detección de anomalías en las imágenes capturadas, se realizaron programaciones en el software de la cámara seleccionada, utilizando herramientas de visión basadas en reglas, como la medición de distancias y el análisis de manchas. Además, se diseñó una interfaz de usuario (HMI) para que los operarios puedan interactuar fácilmente con el sistema.

El sistema diseñado fue validado, logrando un porcentaje de aciertos del 97.8% en la detección de fallas y reduciendo los tiempos de inspección por tarjeta en un 82%. La parte estructural del sistema fue simulada bajo las cargas esperadas, alcanzando altos factores de seguridad y desplazamientos mínimos de 0.002 mm. Además, los esfuerzos se mantuvieron por debajo del límite elástico del material.

**Palabras clave:** bolas de soldadura, cámara HMI, inspección visual, placas de circuito impreso, pines torcidos, puentes de soldadura, sistemas de visión.



# Abstract

The production of printed circuit boards (PCBs) at Gener8 is affected by deficiencies in anomaly detection. Currently, the inspection process is conducted manually by operators, leading to inadequate detection of issues such as solder balls, solder bridges, and bent pins. These deficiencies disrupt production flow, increase the need for rework, cause downtime, and result in damage to both the boards and test equipment

To solve this issue, the design of an automatic detection system for PCBs anomalies is proposed, employing a products design and development methodology. This approach prioritizes creating a solution that meets the client's needs.

To isolate the PCB during inspection, a mounting and image capture structure was developed, which improved the quality of the obtained images. This structure includes supports for the lighting, camera, and PCB, ensuring the optical requirements are satisfied to capture the entire field of view.

To detect anomalies in the captured images, programming was developed in the camera's software, utilizing rule-based vision tools such as distance measurement and stain analysis. Additionally, a user interface (HMI) was designed to enhance interaction with the system and improve usability.

The designed system was validated, achieving a success rate of 97.8 % and reducing inspection time by 82 %. The structural simulations demonstrated high safety factors and minimum displacements of 0.002 mm. Furthermore, the stresses were under the material's elastic limit.

**Keywords:** bent pins, camera, HMI, printed circuitboards, solder balls, solder bridges, visual inspection, vision systems.



*dedicatoria*

A mis padres, por su amor incondicional y su apoyo constante a lo largo de mi vida. Su fe en mí me ha impulsado a superar cada desafío.



# Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a Dios por permitirme culminar esta etapa y superar cada desafío en mi camino. Él me otorgó la fortaleza necesaria para empezar de nuevo y luchar por mis sueños.

Agradezco profundamente a mis padres, quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional en todos mis proyectos y me han motivado a ser una mejor persona. Ellos han cuidado de mí y me han proporcionado numerosas oportunidades para mi crecimiento personal y profesional. Siempre estaré agradecida y en deuda con ellos. También quiero expresar mi gratitud a mis hermanos por respaldar mis decisiones y acompañarme en este proceso.

Quisiera agradecer a mi pareja, quien es mi mejor amigo y ha estado a mi lado en los momentos difíciles de estos años. Su apoyo incondicional me ha impulsado a concluir esta etapa. Le estaré eternamente agradecida por creer en mis capacidades, por su paciencia, y por guiarme y motivarme cada día.

Extiendo mi agradecimiento a mi asesor industrial, quien me brindó la oportunidad de desarrollar el proyecto en Gener8, así como el tiempo y los recursos necesarios para su realización.

Agradezco a todos quienes compartieron sus conocimientos y me guiaron en mi formación académica, permitiéndome crecer en mi ámbito profesional, especialmente a mi asesor, quien me acompañó durante todo el proceso de desarrollo del proyecto.

Finalmente, quiero agradecer al encargado del Laboratorio de Visión del Tecnológico de Costa Rica por permitirme utilizar sus instalaciones para este proyecto. Sin su apoyo, la validación y finalización del mismo no habrían sido posibles.

Sofia Valverde Gutierrez

Cartago, 20 de noviembre de 2024



# Índice general

Índice de figuras	v
Índice de tablas	ix
Lista de abreviaciones	ix
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Entorno del proyecto . . . . .	1
1.2. Definición del problema . . . . .	2
1.2.1. Generalidades . . . . .	2
1.2.2. Justificación . . . . .	2
1.2.3. Síntesis del problema . . . . .	3
1.3. Objetivo general . . . . .	3
1.4. Objetivos Específicos . . . . .	3
1.5. Enfoque de la solución . . . . .	3
1.6. Estructura del documento . . . . .	6
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>7</b>
2.1. Descripción . . . . .	7
2.2. Placas de Circuito impreso . . . . .	7
2.2.1. Normas en la elaboración de PCBs . . . . .	8
2.2.2. Fallos en las PCBs . . . . .	11
2.3. Sistemas de Visión . . . . .	13
2.3.1. Generalidades de visión artificial . . . . .	13
2.3.2. Elementos para la toma de imágenes . . . . .	14
2.3.3. Procesamiento de imágenes . . . . .	17
2.3.4. Aplicaciones de inspección . . . . .	18
2.3.5. Herramientas de procesamiento en sistemas de visión para aplicaciones de inspección . . . . .	21
<b>3. Metodología</b>	<b>25</b>
3.1. Descripción del proceso actual . . . . .	25
3.2. Identificación de necesidades y especificaciones del cliente . . . . .	28
3.2.1. Procesado de la información . . . . .	28
3.2.2. Jerarquización de las necesidades . . . . .	30

3.2.3.	Categorización de las necesidades . . . . .	31
3.2.4.	Definición de especificaciones . . . . .	31
3.3.	Conceptualización del proceso de diseño . . . . .	34
3.3.1.	Descomposición funcional . . . . .	34
3.4.	Búsqueda y selección de conceptos . . . . .	36
3.4.1.	Iluminación . . . . .	36
3.4.2.	Estructura de montaje y toma de imágenes . . . . .	38
3.4.3.	Cámara . . . . .	42
3.4.4.	Óptica . . . . .	45
3.4.5.	Sensor posición de tarjeta . . . . .	46
3.4.6.	Resumen de selección de conceptos . . . . .	50
<b>4.</b>	<b>Solución propuesta</b>	<b>53</b>
4.1.	Diseño estructural del sistema . . . . .	53
4.1.1.	Estructura de aislamiento . . . . .	53
4.1.2.	Sujeción de la cámara . . . . .	57
4.1.3.	Soporte para la iluminación . . . . .	58
4.1.4.	Sujeción de la PCB . . . . .	61
4.1.5.	Soporte del interruptor de cierre de puerta . . . . .	62
4.1.6.	Ensamblaje de la estructura para la captura de imágenes . . . . .	63
4.2.	Diseño eléctrico . . . . .	64
4.2.1.	Conexión de la cámara . . . . .	64
4.2.2.	Conexión de los sensores . . . . .	65
4.2.3.	Conexión de la iluminación . . . . .	67
4.3.	Diseño del Software . . . . .	68
4.3.1.	Iniciación de sistema . . . . .	68
4.3.2.	Detección de fallos por soldadura . . . . .	71
4.3.3.	Detección de fallos por pines torcidos . . . . .	77
4.3.4.	HMI del sistema . . . . .	81
<b>5.</b>	<b>Validación del diseño y análisis de resultados</b>	<b>83</b>
5.1.	Estructura para la captura de imágenes . . . . .	83
5.2.	Software de detección de fallas . . . . .	88
<b>6.</b>	<b>Análisis económico</b>	<b>101</b>
6.1.	Análisis de flujos netos de efectivo . . . . .	101
6.2.	Valor agregado no cuantificable . . . . .	103
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>105</b>
7.1.	Conclusiones . . . . .	105
7.2.	Recomendaciones . . . . .	106
	<b>Bibliografía</b>	<b>107</b>
	<b>Apéndices</b>	<b>111</b>

---

<b>A. Planos de la Estructura</b>	<b>113</b>
<b>B. Plano Eléctrico</b>	<b>121</b>



# Índice de figuras

1.1. Proceso de desarrollo del sistema. Elaboración propia. . . . .	5
2.1. Representación de la tecnología de agujero pasante [1]. . . . .	8
2.2. Representación de tecnología de montaje superficial [1]. . . . .	8
2.3. Pin visiblemente torcido; el pin se encuentra desalineado en más del 50 % de su espesor [2]. . . . .	12
2.4. Pines con alturas fuera del rango de tolerancia establecido [2]. . . . .	12
2.5. Bolas de soldadura que no violan el espacio eléctrico mínimo establecido [2].	13
2.6. Bolas de soldadura que violan el espacio eléctrico mínimo establecido [2]. . .	13
2.7. Exceso de soldadura en componente de la PCB [2]. . . . .	13
2.8. Etapas de un sistema de visión artificial. Elaboración propia. . . . .	14
2.9. Sistema de visión para la inspección de PCBs elaborado a partir de una Raspberry Pi y la librería Open VC [3]. . . . .	18
2.10. Sistema de visión con cámaras inteligentes [4]. . . . .	19
2.11. Sistema de visión con el uso de robots [5]. . . . .	19
2.12. Sistema de visión transportables [6]. . . . .	20
2.13. Sistema de visión con unidad de control, con interfaz de usuario y teclado [7].	20
2.14. Sistema de visión con tecnología 3D [8]. . . . .	21
2.15. Técnica de detección de Blobs [9]. . . . .	21
2.16. Técnica de detección de patrones. Patrón en la parte superior e imagen buscada en parte inferior [10]. . . . .	22
2.17. Técnica de histograma. El eje X representa la escala de grises (0 a 255), el eje Y representa el número de píxeles [11]. . . . .	22
2.18. Detección de márgenes entre píxeles. Se muestran 4 márgenes detectados [12].	23
2.19. Medición de distancia entre blob y línea. [13]. . . . .	23
3.1. PCB con mayor demanda en la empresa. . . . .	27
3.2. PCB 98 L con anomalía por soldadura detectada. . . . .	27
3.3. PCB 98 L con fallo por bolas de soldadura. . . . .	28
3.4. PCB 98 L con cortos por puentes de soldadura. . . . .	29
3.5. PCB 98 L con pines torcidos. . . . .	29
3.6. Representación caja negra. Elaboración propia . . . . .	34
3.7. Descomposición funcional del problema. Elaboración propia. . . . .	35
4.1. Perfil estructural utilizado. Elaboración propia. . . . .	54

4.2. Estructura de aislamiento del sistema. Vista Externa. Elaboración propia. . .	55
4.3. Estructura de aislamiento del sistema. Vista Interna. Elaboración propia. . .	55
4.4. Sistema de cierre de puertas. Elaboración propia. . . . .	56
4.5. Apertura para cableado. Vista cara interna. Elaboración propia. . . . .	56
4.6. Apertura para cableado. Vista cara externa. Elaboración propia. . . . .	56
4.7. Soporte de la cámara. Elaboración propia. . . . .	57
4.8. Colocación del soporte de la cámara. Elaboración propia. . . . .	58
4.9. Iluminación tipo anillo de luz difusa. Elaboración propia. . . . .	58
4.10. Opciones de ubicación para la iluminación tipo anillo de luz difusa [14]. . . .	59
4.11. Soporte de iluminación diseñado. Elaboración propia. . . . .	59
4.12. Soporte de iluminación diseñado, instalado en la iluminación seleccionada. Elaboración propia. . . . .	60
4.13. Soporte de iluminación integrado en la estructura de aislamiento. Elaboración propia. . . . .	60
4.14. Placa diseñada para la ubicación del soporte de PCBs de la empresa. Elabo- ración propia. . . . .	61
4.15. Base diseñada para la sujeción de la PCB 98 L. Elaboración propia. . . . .	61
4.16. Diseño completo de la sujeción de la tarjeta. Elaboración propia. . . . .	62
4.17. Soporte para el interruptor de cierre de puerta. Elaboración propia. . . . .	62
4.18. Vista exterior del sistema de montaje y captura de imágenes. Elaboración propia. . . . .	63
4.19. Vista interior del sistema de montaje y captura de imágenes. Elaboración propia.	63
4.20. Puertos de conexión de la cámara: 1) Conector Micro-HDMI, 2) Conector del cable de alimentación de E/S, 3) Conector Ethernet 1, 4) Conector USB-C, 5) Conector Ethernet 0, 6) Conector de iluminación [15]. . . . .	64
4.21. Conexión de la cámara. Elaboración Propia. . . . .	65
4.22. PLC y HMI compatibles con el sistema de visión propuesto [16] [17]. . . . .	66
4.23. Diagrama de cable de conexión de E/S [15]. . . . .	66
4.24. Diagrama de conexión eléctrica. Elaboración propia. . . . .	67
4.25. Programación de los sensores en el programa In-Sight Vision Suite. Botón de captura inhabilitado. Elaboración propia. . . . .	69
4.26. Simulación de programación de los sensores en el programa In-Sight Vision Suite. Botón de captura habilitado. Elaboración propia. . . . .	69
4.27. Diagrama de lógica del sistema. Elaboración propia. . . . .	70
4.28. Configuración de la iluminación en el software In-Sight Vision Suite. Elabo- ración propia. . . . .	71
4.29. PCB 98 L vista completa desde el emulador Visual Suite de la cámara 3808.	71
4.30. PCB 98 L vista con acercamiento a componentes. Emulador Visual Suite de la cámara 3808. . . . .	72
4.31. Herramienta de bordes avanzados aplicada a componente de la PCB 98 L. . .	72
4.32. Herramienta de coincidencia de patrones aplicada a fallo por bola de solda- dura. Pines superiores. Emulador Visual Suite de la cámara 3808. . . . .	73

4.33. Diagrama de análisis de fallas por soldadura mediante la herramienta de blobs. Elaboración propia. . . . .	74
4.34. Técnica de detección de blobs aplicada a fallas por bolas de soldadura en pines superiores. Emulador Visual Suite de la cámara 3808. . . . .	75
4.35. Técnica de detección de blobs aplicada a fallas por bolas de soldadura en pines inferiores. Emulador Visual Suite de la cámara 3808.. . . .	75
4.36. Programación de blobs para pines superiores de componentes. Emulador Visual Suite de la cámara 3808. . . . .	76
4.37. Fallo detectado mediante la programación de blobs para los pines superiores del componente. Emulador Visual Suite de la cámara 3808. . . . .	76
4.38. Programación de blobs para pines inferiores de componentes. Emulador Visual Suite de la cámara 3808. . . . .	77
4.39. Fallo detectado mediante la programación de blobs para los pines inferiores del componente. Emulador Visual Suite de la cámara 3808. . . . .	77
4.40. Captura de pines para análisis, apertura de $f=8$ . Elaboración propia. . . . .	78
4.41. Diagrama de análisis de fallas por pines torcidos por medio de la herramienta de blobs y distancia entre blobs. Elaboración propia. . . . .	79
4.42. Programación realiza para pines torcidos. Pines base. Emulador Visual Suite de la cámara 3808. . . . .	80
4.43. Imagen sin anomalías analizada para pines torcidos. . . . .	80
4.44. Fallo detectado en segundo pin. Emulador Visual Suite de la cámara 3808. . . . .	81
4.45. HMI diseñada para el sistema de detección de anomalías en PCBs. Elaboración propia. . . . .	82
5.1. Resultado de análisis de tensión y flexión en la estructura. Solidworks. Elaboración Propia. . . . .	84
5.2. Resultado de la simulación de los desplazamientos en la estructura. Solidworks. Elaboración propia . . . . .	85
5.3. Diagrama de cuerpo libre del tornillo para la viga. Elaboración propia . . . . .	85
5.4. Simulación de esfuerzos del soporte de la cámara y la lente. Elaboración propia. . . . .	86
5.5. Simulación de esfuerzos del soporte de la iluminación. Elaboración propia. . . . .	87
5.6. Cámara Cognex 7200 utilizada para la validación. Propiedad del Tecnológico de Costa Rica . . . . .	89
5.7. Soporte para la cámara. . . . .	90
5.8. Iluminación tipo anillo de luz difusa utilizado para la validación. Propiedad del Tecnológico de Costa Rica . . . . .	90
5.9. Base diseñada para las PCBs. Elaboración propia. . . . .	90
5.10. Montaje de la cámara y base de la PCB en posición fija para la validación. Elaboración propia. . . . .	91
5.11. Colocación de la PCB en el sistema de validación. Elaboración propia. . . . .	91
5.12. Simulación de conexión de sensores y captura de imagen, no activación de sensor de PCB. Insight Visual Suite 5.9.0. Elaboración propia . . . . .	92
5.13. Simulación de conexión de sensores y captura de imagen, no activación de uno de los interruptores de puerta. Insight Visual Suite 5.9.0. Elaboración propia. . . . .	92

---

5.14. Simulación de conexión de sensores y captura de imagen, activación de todas las entradas. Insight Visual Suite 5.9.0. Elaboración propia . . . . .	93
5.15. HMI para validación del sistema. Insight Visual Suite 5.9.0. Elaboración propia . . . . .	95
5.16. Inspección de componente U5. Fallo por bola de soldadura detectado. Cámara Insight 7200, programa Insight Visual Suite 5.9.0. . . . .	95
5.17. Inspección de componente U43. Fallo por bola de soldadura detectado. Cámara Insight 7200, programa Insight Visual Suite 5.9.0. . . . .	96
5.18. Inspección de componente U57. Fallo por puente de soldadura detectado. Cámara Insight 7200, programa Insight Visual Suite 5.9.0. . . . .	97
5.19. Inspección de componente U8. Fallo por puente de soldadura detectado. Cámara Insight 7200, programa Insight Visual Suite 5.9.0. . . . .	98
5.20. Inspección de componente J8. Fallo por pines torcidos detectado. Cámara Insight 7200, programa Insight Visual Suite 5.9.0 . . . . .	99

# Índice de tablas

2.1. Documentos relacionados con la normativa para la elaboración de tarjetas de circuitos impresos o ensambles [2]. . . . .	9
2.2. Fallas frecuentes en las PCBs [18]. . . . .	11
3.1. Escala para la categorización de las necesidades. . . . .	31
3.2. Categorización de las necesidades. . . . .	31
3.3. Lista de Métricas . . . . .	32
3.4. Valores objetivo . . . . .	33
3.5. Filtrado de conceptos para subfunción de iluminación. . . . .	37
3.6. Evaluación de conceptos para la subfunción de iluminación. . . . .	38
3.7. Filtrado de conceptos para la subfunción de estructura. . . . .	41
3.8. Evaluación de conceptos para subfunción de estructura. . . . .	42
3.9. Filtrado de conceptos para cámara. . . . .	44
3.10. Evaluación de conceptos para la cámara. . . . .	44
3.11. Filtrado de conceptos para la óptica. . . . .	46
3.12. Evaluación de conceptos para la óptica. . . . .	46
3.13. Filtrado de conceptos para sensor de posición de PCB. . . . .	48
3.14. Evaluación de conceptos para el sensor de posición de la PCB. . . . .	48
3.15. Filtrado de conceptos para interruptor de cierre de puerta. . . . .	49
3.16. Evaluación de conceptos para sensor de cierre de puerta. . . . .	50
5.1. Comparación entre la cámara seleccionada para la propuesta y la cámara disponible para la validación [19] [20]. . . . .	88
5.2. Resumen de datos de producción de la tarjeta 98 L, datos 2022 - septiembre 2024, Cartago, Costa Rica . . . . .	93
5.3. Datos de PCBs para validacion. . . . .	100
6.1. Costos directos o inversión inicial para el sistema de visión desarrollado. . . . .	101
6.2. Costos indirectos u operativos de la inversión para el proyecto en el año uno. . . . .	102
6.3. Flujos netos de efectivo para el proyecto . . . . .	103



# Lista de abreviaciones

## Abreviaciones

AMFE	Análisis Modal de Fallos y Efectos
Blobs	Análisis de Manchas
CCD	Dispositivo de Carga Acoplada
CMOS	Semiconductor Complementario de Óxido Metálico
FINE	Fomento de la Integración de la Nuevas Estrategias
GND	Tierra
HMI	Interfaz Humano Máquina
I/O	Entradas/Salidas
ID	Índice de Deseabilidad
IP	Protocolo de Internet
LED	Diodo Emisor de Luz
NC	Normalmente Cerrado
NO	Normalmente Abierto
NPN	Negativo-Positivo-Negativo
PC	Procesador Central
PCB	Placa de Circuito Impreso
PCBs	Placas de Circuito Impreso
PLC	Controlador Lógico Programable
PNP	Positivo-Negativo-Positivo
ROI	Región de interés
ROI	Retorno de Inversión
S/N	Numero serial
SMT	Tecnología de Montaje Superficial
TCP	Protocolo de Control de Transmisión
THT	Tecnología de Agujero Pasante
TIR	Tasa Interna de Retorno
VAN	Valor Actual Neto



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Entorno del proyecto

Gener8 es una empresa estadounidense fundada en 2002, cuya sede principal se encuentra en San José, California. La compañía ofrece una amplia gama de servicios de ingeniería, que incluyen diseño de productos, desarrollo, creación de prototipos, fabricación y gestión de la cadena de suministro. Gener8 colabora con diversos clientes en múltiples industrias, como biotecnología, ciencias biológicas y dispositivos médicos [21].

La empresa tiene tres sedes en Estados Unidos: una en Carlsbad dedicada a la manufactura de consumibles, otra en San José California especializada en servicios de ingeniería y manufactura y una tercera en Boston Massachusetts enfocada en el desarrollo de software. Fuera de Estados Unidos, la única sede se encuentra en la Zona Franca de La Lima, Cartago, Costa Rica. Esta sede, inaugurada en 2022, emplea actualmente a 46 personas en áreas administrativas, ingeniería y manufactura.

La apertura de la sede en Costa Rica tuvo como objetivo ofrecer soluciones de manufactura para los clientes de Gener8, permitiendo la creación de dispositivos desde su diseño hasta su desarrollo a un costo reducido. El país fue elegido por los beneficios que ofrece el Estado a las zonas francas y su amplia disponibilidad de mano de obra calificada. Actualmente, la mayor parte de los ingresos de la empresa proviene del diseño de ingeniería, representando el 70 %, mientras que el 30 % restante corresponde a la manufactura de productos. Se busca que las ganancias por manufactura aumenten progresivamente gracias a la planta de Cartago.

Gener8 Costa Rica está en proceso de trasladar al país la producción de gran parte de los dispositivos desarrollados en Estados Unidos. Entre los nuevos productos se incluyen máquinas para el análisis de sangre en animales, dispositivos para el análisis de proteínas y diagnósticos de enfermedades en humanos, entre otros. Actualmente, la empresa se dedica a la manufactura de varios productos, como dispositivos para el tratamiento del glaucoma, tratamientos estéticos para la piel, cables y placas de circuito impreso (PCBs) [21].

## 1.2. Definición del problema

### 1.2.1. Generalidades

En la zona franca de La Lima se producen 25 tipos distintos de PCBs, dirigidos a diversos clientes cuya identidad no puede revelarse por razones de confidencialidad. La producción varía según la demanda, con órdenes a realizar cada semana.

La fabricación de las PCBs incluye pruebas funcionales fundamentales antes de la aprobación para su envío. Las tarjetas se entregan a los operarios en cajas de hasta 200 unidades, clasificadas en “a probar” y “no probar”. Las tarjetas clasificadas como “no probar” no requieren revisión; solo se les graba el código serial. Por el contrario, las tarjetas “a probar” deben, además de recibir el grabado láser del código serial, ser revisadas individualmente siguiendo una guía de pruebas funcionales específica para cada tipo de PCB.

El proceso de grabado láser es lento, ya que para cada tipo de PCB es necesario colocar el dispositivo de seguridad en la máquina y colocar las tarjetas una por una para grabar el número serial. Una vez completado este paso, se escanea el código, y las tarjetas “a probar” deben someterse a un proceso de pruebas funcionales que incluye colocarlas en el dispositivo de prueba, programar la tarjeta, realizar una inspección visual y registrar datos como tensiones y corrientes.

La inspección visual busca detectar fallos como la falta de componentes, componentes sueltos, soldaduras de baja calidad y pines torcidos, entre otros. Este proceso se realiza con luz natural y sin dispositivos de ayuda visual como cámaras o microscopios; estos últimos se utilizan únicamente para una revisión posterior en caso de fallos en la prueba funcional de cada tarjeta. La duración de la inspección visual varía según el tamaño de la tarjeta y la meticulosidad de cada operario, lo que puede incrementar el tiempo de producción. Además, esta tarea puede resultar agotadora para el operario y está sujeta a sesgos humanos.

### 1.2.2. Justificación

En la empresa Gener8 se han identificado ineficiencias en el proceso de producción de PCBs. El tiempo y los recursos necesarios para realizar las pruebas son altos, con un promedio de varios días por lote y costos que alcanzan cifras significativas. Los precios de las tarjetas varían, oscilando entre \$100 y \$900 por unidad, con demandas mensuales de hasta 200 tarjetas por tipo.

Los tiempos de revisión de las PCBs se ven afectados por la manipulación del operario en diversas etapas, que incluyen: extraerlas de la caja inicial, colocarlas en la máquina de grabado láser, almacenarlas, realizar la revisión visual, llevar a cabo pruebas funcionales en dispositivos específicos para cada PCB, extraer valores, completar formularios y colocarlas en el estante de revisión completa. Este proceso puede demorar entre 5 y 20 minutos por tarjeta.

Reducir el tiempo de las pruebas implica, a su vez, disminuir los costos de producción. Las pruebas visuales demoran el proceso de aplicación de las pruebas de funcionalidad, y estas demoras varían según el tipo de tarjeta, ya que no todas tienen los mismos componentes, dimensiones, fallos comunes, aplicaciones e indicaciones de inspección. Además, un operario que pase todo el día realizando inspecciones visuales durante varios días puede experimentar fatiga, lo que puede comprometer la calidad de las revisiones. Por lo tanto, se concluye que la inspección visual es el actual cuello de botella del proceso, lo que hace necesario implementar un sistema que automatice este proceso.

### 1.2.3. Síntesis del problema

La producción de PCBs en la empresa Gener8 se ve afectada por pérdidas de tiempo causadas por diversos factores, destacando las pruebas visuales, que varían según la tarjeta a revisar y están sujetas a errores humanos. Parte del problema radica en la pérdida de tarjetas dañadas, así como en el riesgo de que los artefactos de prueba se vean afectados por un cortocircuito. Por lo tanto, es necesario implementar un sistema de detección automática de anomalías en las tarjetas.

## 1.3. Objetivo general

Proponer un sistema de visión por computadora para la detección automática de anomalías en las PCBs de la empresa Gener8.

## 1.4. Objetivos Específicos

- Diagnosticar el proceso para la detección de anomalías en las PCBs de la empresa Gener8, además de los factores para el desarrollo de un sistema que satisfaga al cliente.
- Diseñar el sistema de montaje y toma de imágenes para las PCBs de la empresa Gener8, considerando los principios y requisitos técnicos establecidos durante la etapa de diseño.
- Diseñar un sistema de detección de anomalías a partir de imágenes.
- Validar el sistema de detección automática de anomalías para comprobar su capacidad de identificar fallas en las PCBs.

## 1.5. Enfoque de la solución

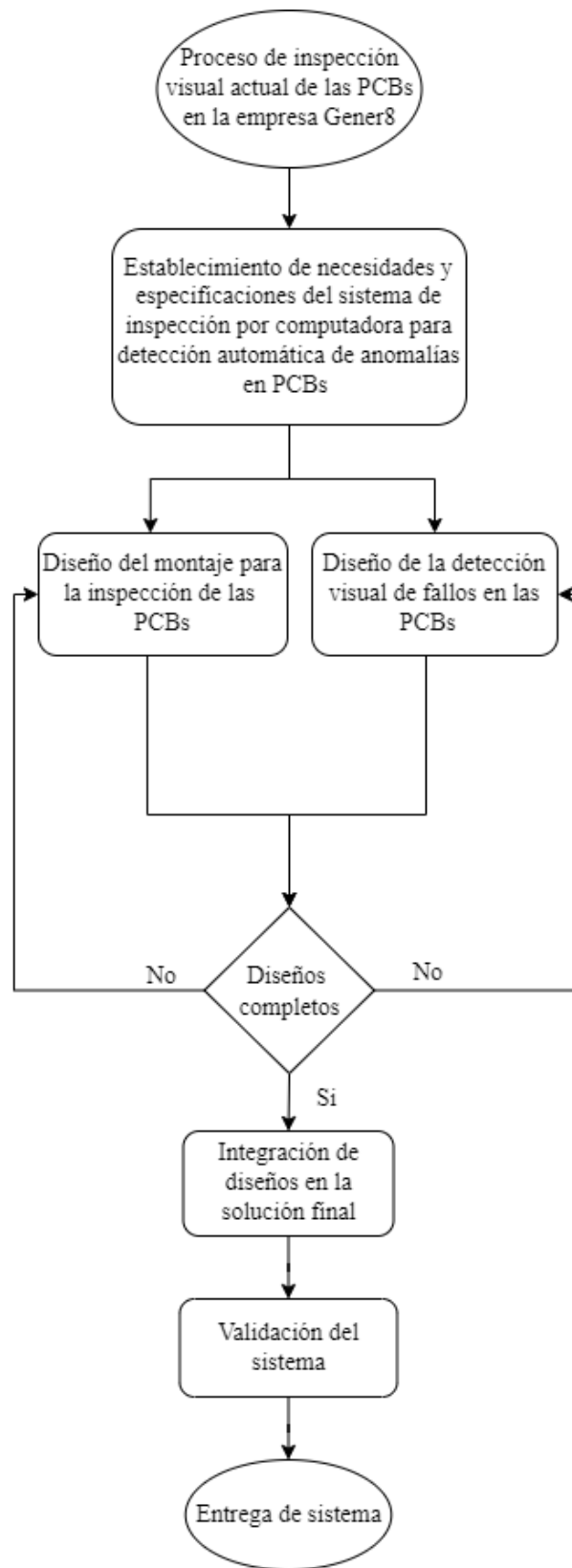
Posterior al análisis del problema planteado en este trabajo y a la aplicación de la metodología de Ulrich y Eppinger, se definió el enfoque de solución para el proyecto: el desarrollo de un

sistema de visión por computadora que detecte imperfecciones en las PCBs en análisis.

Dado que este trabajo representa una primera iteración, la empresa busca evaluar la viabilidad de una solución como esta. Por lo tanto, el problema se limitará a un solo tipo de PCB de los 25 que maneja la empresa. Asimismo, como limitación adicional, de las diez fallas potenciales en los PCBs (como elementos flojos, falta de componentes, soldadura ineficiente, bolas de soldadura, puentes, componentes torcidos, entre otros), se optó por centrarse únicamente en las tres fallas más comunes, a sugerencia del cliente.

En la figura 1.1 se presenta un diagrama que ilustra el proceso de desarrollo del sistema, dividido en diferentes etapas. Se incluye la etapa de diseño de la parte mecánica del montaje del sistema de inspección, considerando los principios y requisitos técnicos establecidos. Este montaje facilita el aislamiento del sistema de inspección para evitar errores por contaminación del entorno y proporciona soporte a los instrumentos de inspección necesarios.

Paralelamente, se trabajó en el diseño del software para la inspección visual, que permite identificar las anomalías en las PCBs en un tiempo menor al actual y genera un informe sobre las fallas encontradas. Una vez completado el desarrollo del sistema, se implementó el método de validación propuesto para el sistema de detección automática de anomalías.



**Figura 1.1:** Proceso de desarrollo del sistema. Elaboración propia.

## 1.6. Estructura del documento

Este trabajo se estructura en varios capítulos que guían al lector a través del proceso de desarrollo del sistema de visión destinado a la detección de anomalías en las PCBs. A continuación, se describen brevemente cada uno de ellos.

El capítulo 2 presenta el marco teórico del proyecto, donde se definen todos los conceptos relevantes para el estudio de la problemática. El capítulo 3, detalla las etapas de la metodología de diseño elegida. Comienza con la identificación de las necesidades y especificaciones del cliente. Seguidamente, se aborda la conceptualización del proceso de diseño, que incluye una descomposición funcional del problema, una búsqueda de información tanto interna como externa, la definición de conceptos potenciales y la selección del concepto ganador para la solución.

Definido el concepto ganador, el capítulo 4 muestra el diseño del sistema de detección de anomalías. El capítulo 5 especifica las pruebas de validación y el análisis que permite evaluar el cumplimiento de las especificaciones.

El capítulo 6 presenta el análisis económico al sistema diseñado, mostrando su viabilidad y su valor agregado no cuantificable. Por último, el capítulo 7 resume las principales conclusiones que se derivaron del diseño de la solución, incluyendo una serie de recomendaciones para facilitar la futura implementación del proyecto.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Descripción

En este capítulo se presentan todos los fundamentos teóricos relevantes para el desarrollo del proyecto, con el objetivo de proporcionar al lector una perspectiva que facilite su comprensión. Se incluyen aspectos generales sobre visión computarizada, cámaras, imagen digital, procesamiento de imágenes, PCBs, fallos en PCBs, herramientas de detección de fallas y aplicaciones de sistemas de visión. Estos fundamentos son esenciales para el desarrollo del proyecto. Es importante destacar que este capítulo se desarrolló suponiendo que el lector posee conocimientos básicos en las ramas de ingeniería relacionadas, lo que permite una comprensión completa de los conceptos abordados.

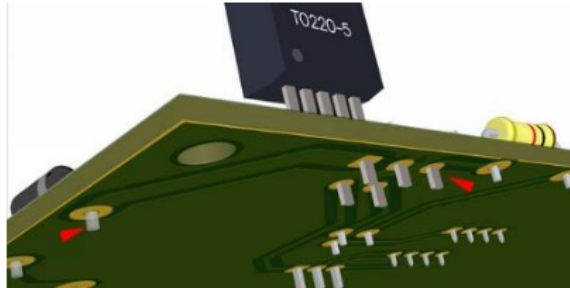
### 2.2. Placas de Circuito impreso

Una placa de circuito impreso (PCB) por sus siglas en inglés, se define como una estructura construida a base de un sustrato no conductor que se emplea para el montaje e interconexión de componentes electrónicos a través de rutas o pistas de un material conductor grabadas sobre el sustrato [1].

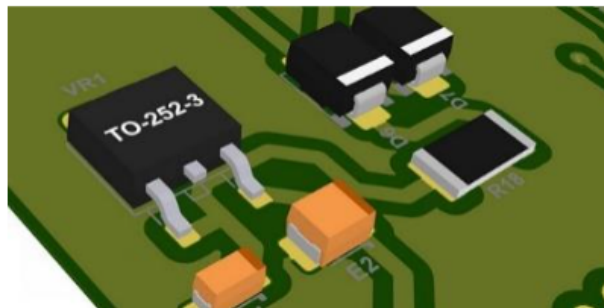
Entre los materiales más utilizados como sustrato se encuentran: sustratos de resina epoxi reforzada y fibra de vidrio. La capa conductora es comúnmente de cobre y puede presentar una capa de protección de resina fotosensible. Su construcción varía según la aplicación y se clasifica en función del número de capas del material conductor, distinguiéndose entre PCB monocapa, PCB bicapa y PCB multicapa [1][22].

Los componentes que se pueden montar en una PCB pueden ser pasivos (inductores, resistencias y condensadores) o activos (amplificadores operacionales y baterías). Para el montaje de estos componentes en las placas, existen dos sistemas comunes: la tecnología de agujero pasante (THT) y la tecnología de montaje superficial (SMT). El montaje mediante tecnología de agujero pasante utiliza los orificios realizados en las PCB para el ensamblaje de

los componentes, como se aprecia en la figura 2.1. Por otro lado, el montaje por tecnología de montaje superficial consiste en soldar los terminales de conexión del componente a pads (pistas de conexión en cobre) ubicados en la misma cara donde se colocan, sin necesidad de perforaciones, tal como se muestra en la figura 2.2 [1][3].



**Figura 2.1:** Representación de la tecnología de agujero pasante [1].



**Figura 2.2:** Representación de tecnología de montaje superficial [1].

### 2.2.1. Normas en la elaboración de PCBs

Con el paso de los años y el avance tecnológico, la demanda de PCBs ha crecido, lo que ha llevado a que estas placas sean cada vez más complejas, tanto en su estructura como en sus componentes, con una tendencia hacia el uso de multicapa y la miniaturización de las partes. Para regular su elaboración y evitar defectos, se han establecido diversas normas a nivel internacional y nacional [3]. Algunas de las normas existentes son: IPC-AJ-820 (manual de montaje y soldadura), IPC-A-610 (aceptabilidad de los conjuntos electrónicos) y IPC J-STD-001 (requisitos para conjuntos eléctricos y electrónicos soldados).

En la tabla 2.1 se presentan especificaciones relevantes para las PCBs, junto con su propósito y definición.

**Tabla 2.1:** Documentos relacionados con la normativa para la elaboración de tarjetas de circuitos impresos o ensamblajes [2].

Propósito del documento	Especificación n°	Definición
Estándar de diseño	IPC-2220 (Familia) IPC-7351 IPC CM C 770	Guías del proceso de ensamblaje de componentes para asistir en el diseño de la PCB y en el ensamblaje, con un enfoque en los patrones de pistas.
Requisitos de PCB	IPC-6010 (Familia) IPC-A-600	Requisitos y documentación de aceptabilidad para sustratos.
Documentación del producto final	IPC-D-325	Requisitos de ensamble del producto final.
Estándares del producto final	J-STD-001	Requisitos para la soldadura, que incluyen la descripción de los métodos de evaluación, la frecuencia de las pruebas y las habilidades necesarias para cumplir con los requisitos de control del proceso.
Estándar de aceptabilidad	IPC-A-610	Indica varias características del ensamblaje relacionadas con las condiciones mínimas deseables, según el estándar de funcionamiento del producto final, y refleja las diversas condiciones que están fuera de control.
Manipulación y almacenamiento	IPC-1601A	Indica las pautas para el manejo y almacenamiento de las PCBs.
Retrabajo y reparación	IPC-7711/7721	Documentación que establece los procedimientos para eliminar y reemplazar recubrimientos de barniz y componentes, así como para realizar modificaciones o reparaciones en el laminado de la tarjeta, los conductores y los orificios con metalización.

### Norma IPC-A-610

La norma IPC-A-610 se considera relevante para el proyecto, ya que especifica los criterios visuales de inspección de calidad para los componentes y la soldadura de circuitos electrónicos. Esta norma tiene una interpretación ilustrativa y detalla varias características de las tarjetas de circuito impreso, relacionadas con las condiciones mínimas deseables según el estándar de funcionamiento del producto final [2].

El documento presenta criterios visuales que abarcan pines, soldadura, posición de componentes, cables, pistas y condiciones del laminado, entre otros. Los criterios se clasifican para cada clase de producto en: ideal, aceptable, defecto e indicador de proceso. Es importante señalar que esta norma no busca definir los procesos para llevar a cabo las operaciones de ensamblaje ni autorizar reparaciones, modificaciones o cambios en el producto [23].

### Norma IPC-1601

Este proyecto aborda la manipulación y el resguardo de PCBs, por lo que la norma IPC-1601, titulada “Pautas para el manejo y almacenamiento de placas impresas”, se considera relevante. El objetivo de la norma IPC-1601 es garantizar que las PCBs se mantengan en condiciones óptimas para prevenir daños y degradación.

La norma abarca aspectos relacionados con [24]:

- **Manipulación:** se enfatiza la importancia de manejar las PCBs con cuidado para evitar contaminaciones, daños físicos y electrostáticos. Se recomienda el uso de guantes y herramientas adecuadas.
- **Almacenamiento:** las PCBs deben ser almacenadas en ambientes controlados, evitando la exposición a humedad, temperaturas extremas y contaminantes químicos.
- **Empaque:** se sugiere utilizar empaques adecuados que protejan las placas de daños físicos y estáticos durante el transporte y almacenamiento.
- **Rotulación y seguimiento:** es importante etiquetar correctamente las PCBs y mantener un registro detallado de su almacenamiento y manipulación.
- **Inspección:** se recomienda realizar inspecciones regulares para detectar cualquier signo de daño o deterioro.

Además, la norma IPC-1601 establece criterios sobre los materiales adecuados para el almacenamiento de PCBs. Algunos criterios indicados son [24]:

- **Durabilidad:** los materiales utilizados deben ser lo suficientemente duraderos.
- **Materiales antiestáticos:** se recomienda utilizar empaques y materiales antiestáticos para prevenir descargas electrostáticas.
- **Materiales no reactivos:** los materiales deben ser inertes y no reaccionar químicamente con las PCBs.
- **Protección física:** se deben usar materiales que ofrezcan una buena protección física para evitar daños por impactos o presión.
- **Transpirabilidad:** los materiales deben permitir cierta transpiración para evitar la acumulación de humedad.

Estas pautas garantizan una manipulación y almacenamiento adecuados, minimizando así el riesgo de daños a las PCBs.

### 2.2.2. Fallos en las PCBs

A pesar de las guías y normas establecidas para la elaboración de PCBs, persiste la probabilidad de que se presenten defectos debido a prácticas de diseño inadecuadas. Es común encontrar defectos como componentes desalineados, conexiones de soldadura incompletas y cortocircuitos. En la tabla 2.2 se presenta un resumen de los defectos comunes en las PCBs.

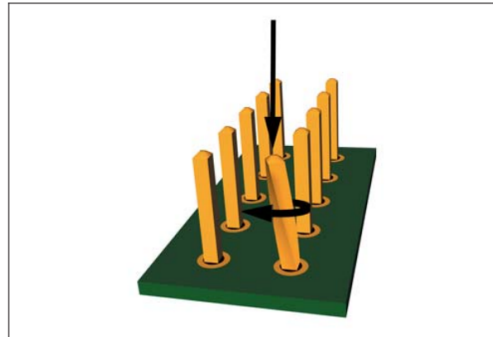
**Tabla 2.2:** Fallas frecuentes en las PCBs [18].

Falla	Tasa de ocurrencia %	Tipo	Relación con soldadura
Circuito Abierto	25	Estructural	Si
Soldadura insuficiente	18	Estructural	Si
Corto	13	Estructural	Si
Falta de componentes eléctricos	12	Estructural	No
Componente desalineado	8	Estructural	Si
Componente eléctrico defectuoso	8	Eléctrico	No
Componente equivocado	5	Eléctrico	No
Exceso de Soldadura	3	Estructural	Si
Componente no eléctrico faltante	2	Estructural	Si
Orientación incorrecta	2	Eléctrico	No
Componente no eléctrico defectuoso	2	Estructural	No

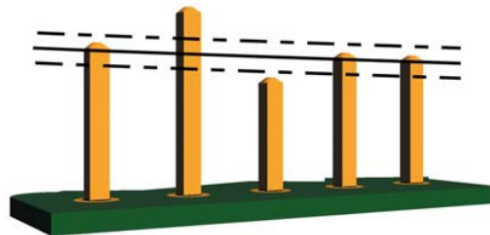
Entre los fallos de interés en este proyecto se encuentran las bolas de soldadura, los pines torcidos y los cortos por exceso de soldadura. Como se mencionó en la tabla 2.2 son comunes en el mercado y presentan las siguientes condiciones de aceptabilidad según la norma IPC-A-610.

### Normativa para pines de conectores en PCBs

Los pines de conectores deben estar rectos, a la altura adecuada y asentados correctamente en las placas. La norma establece como aceptable una desviación del pin del 50 % o menos del espesor del mismo, así como una altura que se encuentre dentro de la tolerancia especificada en el plano [2]. En la figura 2.3 se muestra un pin torcido, mientras que en la figura 2.4 se observa un pin con fallas en la altura de colocación.



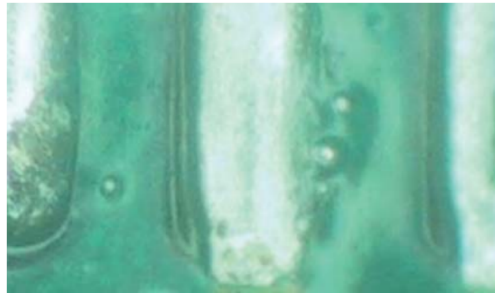
**Figura 2.3:** Pin visiblemente torcido; el pin se encuentra desalineado en más del 50 % de su espesor [2].



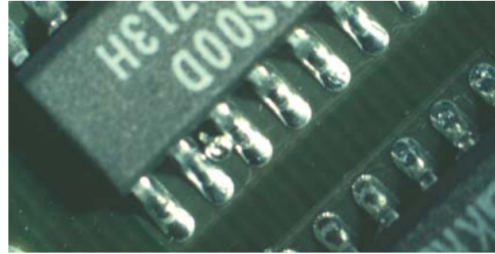
**Figura 2.4:** Pines con alturas fuera del rango de tolerancia establecido [2].

### Normativa para bolas de soldadura en PCBs

Las bolas de soldadura son esferas de pasta de soldadura que salpican alrededor de la conexión durante el proceso de reflujo. Estas bolas son aceptables siempre que no violen el espacio eléctrico mínimo. Pueden estar atrapadas, encapsuladas o adheridas, por ejemplo, en residuos de flux, en el barnizado, soldadas a una superficie metálica, incrustadas en la máscara de soldadura o bajo un componente [2]. En la figura 2.5 se muestran bolas de soldadura que cumplen con la norma y en la figura 2.6 se presentan bolas que no cumplen con los criterios establecidos.



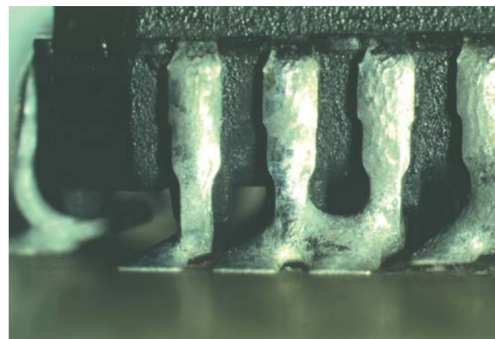
**Figura 2.5:** Bolas de soldadura que no violan el espacio eléctrico mínimo establecido [2].



**Figura 2.6:** Bolas de soldadura que violan el espacio eléctrico mínimo establecido [2].

### Normativa para exceso de soldadura en PCBs

Los excesos de soldadura, puentes o cortos afectan la placa al conectar conductores adyacentes que no deberían estar interconectados, lo que puede causar cortocircuitos. En este caso, la norma establece que no deben existir dichos defectos [2]. En la figura 2.7 se ilustra un puente entre los pines de un componente.



**Figura 2.7:** Exceso de soldadura en componente de la PCB [2].

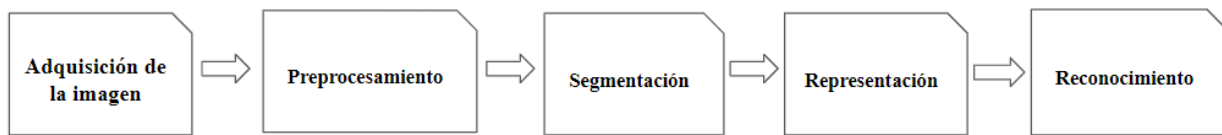
## 2.3. Sistemas de Visión

### 2.3.1. Generalidades de visión artificial

La visión computacional se refiere a la implementación artificial, mediante algoritmos y cálculos matemáticos, que permite dotar al ordenador de la capacidad de percibir y comprender

una imagen. Esto posibilita la obtención y medición de determinadas propiedades de la imagen adquirida [25]. Si bien la arquitectura y las etapas de un sistema de visión dependen de su aplicación, hay algunas fases que se presentan en la mayoría de las implementaciones. Estas etapas, que se muestran en la figura 2.8, se describen a continuación [25][26][27]:

- Captura: esta fase se encarga de la adquisición de la imagen digital, utilizando algún tipo de sensor.
- Preprocesamiento: en esta segunda etapa, se realiza un tratamiento digital de la imagen para eliminar elementos indeseados.
- Segmentación: durante esta etapa, se aíslan los elementos importantes de la imagen.
- Representación: esta etapa se encarga de la extracción de características, convirtiendo datos como bordes o puntos de la imagen en un formato que el ordenador puede interpretar fácilmente.
- Reconocimiento: se interpreta la información de la imagen para tomar decisiones basadas en los datos extraídos



**Figura 2.8:** Etapas de un sistema de visión artificial. Elaboración propia.

### 2.3.2. Elementos para la toma de imágenes

La primera etapa de un sistema de visión consiste en la captura de imágenes. Este proceso se logra mediante la generación de una señal electromagnética en forma de luz, que se transmite, refracta y refleja hasta alcanzar el área del sensor de la cámara. En el sensor, se produce la transducción de la luz a una señal eléctrica. A partir de ese momento, se activa un conjunto de elementos electrónicos que digitalizan, formatean, transmiten y almacenan las imágenes digitales [28].

Una correcta adquisición de la imagen es crucial para el éxito del proceso de reconocimiento. Diversos factores influyen en esta etapa, entre los cuales se encuentran: el hardware del sistema (cámara, óptica, ordenador), el entorno y el posicionamiento de los elementos (iluminación y posición de la cámara) [29].

#### Cámara

La cámara es el componente que permite construir una imagen sobre el plano del sensor, que está compuesto por elementos fotosensibles. Este dispositivo digitaliza la imagen y la

transmite a la tarjeta de adquisición del procesamiento, utilizando un objetivo formado por un conjunto de lentes y un diafragma [28]. Para seleccionar adecuadamente este dispositivo, es necesario considerar los siguientes factores:

- Color o monocromática: es fundamental determinar si se necesita una cámara que capture en color o en escala de grises. Esta elección depende de la aplicación y del presupuesto, ya que las cámaras monocromáticas suelen ser más económicas y requieren menos procesamiento [29].
- Resolución: se refiere a la cantidad de píxeles que tiene la cámara. Un píxel es la unidad mínima de un elemento de la imagen que se puede diferenciar. Por lo tanto, a mayor resolución, mejor será la capacidad para distinguir los detalles más pequeños de los objetos, aunque esto también implica un precio más elevado [29].
- Distancia de trabajo: es la separación entre el objeto que se captura en la imagen y la óptica de la cámara [28][30].
- Tipo de sensor: actualmente existen dos tipos de sensores: CCD y CMOS. Ambas son tecnologías utilizadas para convertir la luz en señal eléctrica. Los sensores CMOS requieren menos energía, pueden capturar secuencias a alta velocidad, son más económicos y permiten la integración de funciones adicionales, como la reducción de ruido y el procesamiento de imágenes directamente en el sensor. Por otro lado, los sensores CCD garantizan un alto grado de calidad y uniformidad en la imagen, ya que cada píxel utiliza la misma ruta para emitir su señal [28][31].
- Montura entre la óptica y el cuerpo de la cámara: característica física que permite unir la óptica con la cámara. Existen monturas tipo C, CS y F. La más común es la tipo C, que deja una separación de 17.5 mm entre la óptica y el sensor. Por otro lado, la montura tipo F se utiliza en cámaras con sensores grandes [28].
- Campo de visión: área bajo inspección que la cámara necesita capturar [30].
- Profundidad de campo: máxima profundidad del objeto necesaria para lograr un enfoque adecuado. [28].

## Óptica

La óptica es un conjunto complejo de lentes y mecanismos dispuestos en un cilindro metálico, que incluye una rosca o bayoneta para su integración al cuerpo de la cámara. Las ópticas modifican la dirección de los fotones al atravesar las lentes, permitiendo determinar la escena a capturar en forma de imagen de un objeto situado a una distancia finita, enfocando la luz en el sensor, que también se encuentra a una distancia fija. Estas ópticas pueden estar compuestas por una única lente o múltiples lentes [28].

Además, las ópticas cuentan con un diafragma que regula la cantidad de luz que llega al sensor. La apertura del diafragma afecta la profundidad de campo, la sensibilidad del sensor y

la cantidad de luz necesaria para capturar una imagen de calidad. La apertura del diafragma se expresa con el número  $f$ ; algunos valores posibles son: 1, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, 22, 32. Cada cifra indica que el objetivo permite el paso del doble de luz en comparación con el valor anterior [28].

En cuanto a la perspectiva, un objeto que está más cerca del lente parece más grande en la imagen que uno que se encuentra más lejos. Al modificar la distancia focal, se varía el tamaño del objeto en la imagen, lo que puede generar un error de perspectiva al utilizar ópticas convencionales. Para corregir este error, se emplean ópticas telecéntricas [28].

Para una correcta selección de este dispositivo, se deben considerar los siguientes factores [28]:

- Montura: debe ser compatible con la montura de la cámara seleccionada.
- Distancia focal: determina el ángulo de visión y, por lo tanto, el tamaño del cuadro de la escena que se proyectará como imagen.
- Formato del sensor de la cámara: se refiere al tamaño del sensor de la cámara. Para una misma distancia focal de la óptica, un menor formato de cámara resulta en un ángulo de visión más pequeño, y viceversa.
- Apertura: determina la cantidad de luz que ingresa a la cámara.

## Iluminación

La iluminación es fundamental para lograr una imagen de alta calidad, facilitar un tratamiento eficaz de la misma y obtener resultados más precisos. Una iluminación descontrolada en el entorno generalmente no es aceptable, ya que puede resultar en imágenes con bajo contraste, reflejos indeseados, sombras y destellos [32].

Al seleccionar la iluminación adecuada para cada aplicación, el objetivo es crear imágenes con un buen contraste que permitan distinguir claramente las regiones de interés. A continuación, se describen varios tipos de iluminación: iluminación posterior, frontal, lateral, por campo oscuro, coaxial, de anillo y difusa continua [32].

- Iluminación posterior: en este método, el objeto a inspeccionar se coloca entre la fuente de luz y la cámara. Esto permite obtener imágenes con bordes bien definidos [32].
- Iluminación frontal: este método implica colocar la cámara y la fuente de luz en la misma dirección, de modo que la cámara capte la luz reflejada por el objeto [32].
- Iluminación lateral: este método utiliza luz cuya dirección de incidencia es paralela a la superficie a inspeccionar y perpendicular al eje de la cámara. Aunque puede resaltar detalles, también puede generar sombras indeseadas [32][28].

- Iluminación por campo oscuro: se logra con el uso de anillos especiales, que emiten haces de luz perpendiculares al eje de la cámara. Se utiliza para visualizar y leer códigos de barras grabados en la superficie del material, también se usa para detectar defectos superficiales [32].
- Iluminación coaxial: este método utiliza un espejo semitransparente que desvía los haces de luz a lo largo del mismo eje que la cámara, generando una luz difusa y homogénea que crea contraste entre las superficies. Sin embargo, su implementación puede ser compleja y costosa [32].
- Iluminación difusa continua: en este tipo de iluminación, la luz difusa está alineada con el eje óptico de la cámara. Se emplea comúnmente para iluminar materiales altamente reflectantes [32].
- Iluminación de anillo: este sistema utiliza luz direccional con un ángulo de incidencia que coincide con el eje de la cámara, colocando el lente en el centro del anillo. Entre sus ventajas se destaca la reducción de sombras [28].

### 2.3.3. Procesamiento de imágenes

Toda imagen capturada por medios ópticos puede experimentar efectos de degradación, que se manifiestan en forma de ruido, pérdida de definición y disminución de la fidelidad de la imagen. Esta degradación puede deberse al ruido en los sensores de captura, errores en el enfoque de la cámara, movimientos involuntarios y efectos de propagación de la radiación en el medio de transmisión. Para contrarrestar estos efectos, se aplican en el preprocesamiento mecanismos conocidos como operaciones de restauración, que incluyen transformaciones geométricas y operaciones básicas [32].

Una vez que la imagen ha sido preparada, se pueden implementar diversas operaciones y algoritmos que permiten modificarla para extraer la información deseada. A continuación, se presentan algunas de estas operaciones [32][29]:

- Transformaciones: son funciones básicas que permiten resaltar detalles en áreas con información importante, sacrificando otras zonas. Se utilizan para mejorar el contraste o el brillo, modificando la intensidad dinámica de regiones con bajo contraste [32].
- Procesamiento morfológico: esta técnica analiza las imágenes en función de sus propiedades de forma, utilizando álgebra de conjuntos. También se puede emplear para la búsqueda de patrones dentro de la imagen [29].
- Filtros: estas operaciones alteran el valor de un píxel respetando las variaciones de intensidad luminosa en su entorno. Este entorno se define mediante una matriz llamada kernel, que está centrada en el píxel analizado [32].
- Segmentación: permite subdividir una imagen en partes o regiones según sus tonalidades [33].

- Representación y descripción: estas operaciones permiten representar una región en términos de sus características externas o internas [33].
- Interpretación: estas funciones son esenciales para descubrir, identificar y comprender patrones relevantes para el objetivo deseado [33].

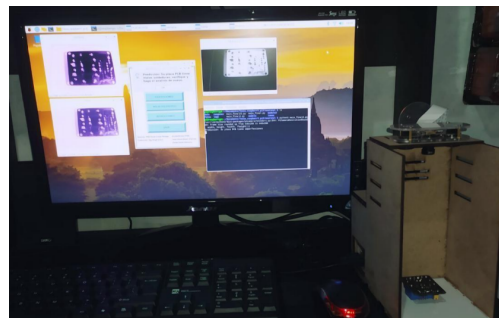
### 2.3.4. Aplicaciones de inspección

Una de las aplicaciones de los sistemas de visión es la inspección y detección de defectos. Los defectos pueden presentarse en cualquier etapa del proceso de fabricación, desde problemas con la calidad de la materia prima hasta la inspección final. Tradicionalmente, los operarios capacitados han llevado a cabo inspecciones manuales para identificar defectos; sin embargo, este enfoque puede estar sujeto a sesgos y errores humanos [34].

La visión artificial representa una mejora significativa respecto a la inspección manual, ya que opera a las velocidades de la línea de producción, no se fatiga, puede detectar incluso los defectos más pequeños y almacena información para fomentar una mejora operativa continua [8]. Entre las opciones para la detección de defectos basadas en sistemas de visión se incluyen: cámaras estándar, cámaras inteligentes, software libre, software patentado, tecnología 2D, tecnología 3D y diversas alternativas de instalación.

Con la visión artificial 2D, se captura y procesa un mapa bidimensional (X, Y). El procesamiento implica comparar las variaciones de intensidad o contraste, por lo que los sistemas de visión 2D requieren entornos altamente controlados. Para implementar estos sistemas, se han desarrollado opciones que incluyen microprocesadores simples, cámaras inteligentes y sistemas transportables, así como unidades de control completas [8].

El desarrollo de sistemas de visión que utilizan microprocesadores representa una alternativa económica para la inspección de productos. Las bibliotecas utilizadas son compatibles con cámaras estándar y sensores de cualquier fabricante, ya que no están vinculadas a ningún proveedor de hardware específico. En la figura 2.9 se presenta un sistema construido con una Raspberry Pi y la biblioteca OpenCV



**Figura 2.9:** Sistema de visión para la inspección de PCBs elaborado a partir de una Raspberry Pi y la librería Open VC [3].

En el ámbito de las cámaras y software dedicados a soluciones industriales, existe una amplia

variedad de fabricantes. Algunos de los más destacados a nivel mundial son: Point Grey, Keyence, Bitmakers, DCM Sistemas, Teledyne Dalsa, Infaimon, Omron, Festo y Cognex. Los productos disponibles en el mercado incluyen cámaras inteligentes todo en uno, controladores de alta velocidad, así como diversas cámaras de área y cámaras de escaneo lineal con tecnologías patentadas.

Además, se pueden emplear herramientas de inspección basadas tanto en inteligencia artificial (IA) como en reglas. Estas últimas corresponden a algoritmos de detección robustos cuya capacidad se puede mejorar mediante el ajuste fino de los parámetros establecidos [4]. En la figura 2.10 se presenta una cámara industrial montado en una línea de producción.



**Figura 2.10:** Sistema de visión con cámaras inteligentes [4].

Por otro lado, se ha implementado el uso de robots para realizar inspecciones con cámaras. Los dispositivos de control se comunican directamente con diferentes robots, sincronizando los sistemas de coordenadas y garantizando un funcionamiento estable al inspeccionar diversas áreas de un objeto, sin necesidad de utilizar más de una cámara [5]. En la figura 2.11 se muestra se presenta un sistema de visión que utiliza robots.



**Figura 2.11:** Sistema de visión con el uso de robots [5].

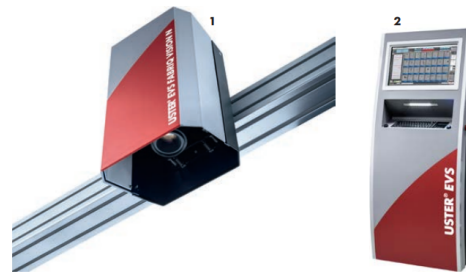
Otras opciones en el mercado son los equipos transportables, que incluyen un monitor mul-

titáctil, iluminación, una cámara de alta resolución y soportes. Este sistema de visión transportable permite realizar fácilmente controles de calidad, análisis de superficie, mediciones y lectura de códigos. En la figura 2.12 se muestra un sistema de visión transportable [6].



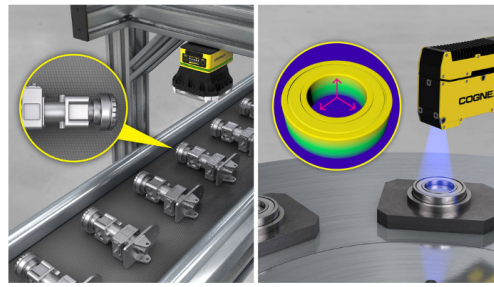
**Figura 2.12:** Sistema de visión transportables [6].

Asimismo, se presentan sistemas que incluyen una unidad de control, la cual permite visualizar defectos en la pantalla de la interfaz de usuario y realizar el procesamiento de adquisición de imágenes en tiempo real. Todos los defectos se detectan, categorizan, almacenan y muestran en la interfaz del operador. Estas capacidades de detección son de alta velocidad y ofrecen una resolución superior para identificar defectos pequeños. La unidad de control requiere un espacio amplio y puede controlar los sensores a distancia [7]. En la figura 2.13 se observa un sistema de visión con el sensor y la unidad de control descritos.



**Figura 2.13:** Sistema de visión con unidad de control, con interfaz de usuario y teclado [7].

Finalmente, se pueden encontrar sistemas de visión 3D. Esta tecnología permite capturar la profundidad de un objeto para generar un mapa tridimensional (X, Y, Z) y realizar su análisis. La visión artificial 3D es especialmente eficaz con objetos que pueden variar en tamaño y forma, como alimentos, soldaduras y metales [8]. En la figura 2.14 se presenta un sistema de visión que utiliza tecnología 3D.



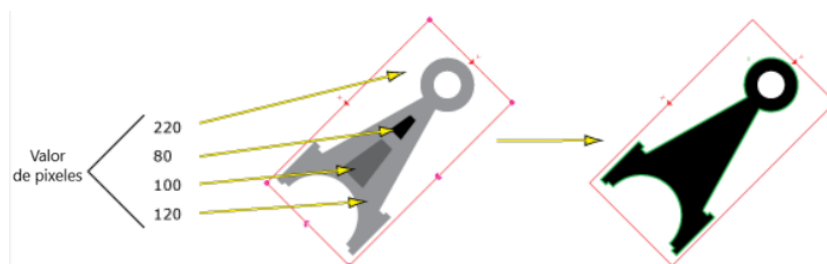
**Figura 2.14:** Sistema de visión con tecnología 3D [8].

### 2.3.5. Herramientas de procesamiento en sistemas de visión para aplicaciones de inspección

Algunas de las herramientas de inspección disponibles en los sistemas de visión dedicados a estas tareas en la industria incluyen [35]:

- Análisis de manchas (Blobs).
- Coincidencia de patrón.
- Detección de defectos.
- Histograma.
- Margenes.
- Inspección de bordes.
- Medición.

En la terminología de visión artificial, cualquier grupo bidimensional de forma variable y con sombreado similar de píxeles conectados se denomina “blob”. La técnica de blobs identifica y extrae un grupo de píxeles, ya sean oscuros o claros, del fondo. Esto se ejemplifica en la figura 2.15, donde todos los píxeles con valores de 220, 80, 100 y 120 se consideran un blob, mientras que el resto corresponde al fondo [9].

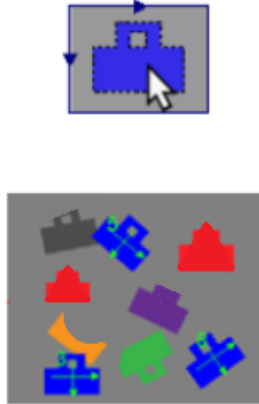


**Figura 2.15:** Técnica de detección de Blobs [9].

Esta herramienta también proporciona características de la estructura obtenida, como posición horizontal, posición vertical, ángulo, área, elongación, perímetro, orificios y extensión. Es una técnica rápida de aplicar que permite ordenar los blobs según su área o puntuarlos de acuerdo con criterios especificados por el usuario [9].

Por otro lado, la herramienta de coincidencia de patrones permite identificar un patrón

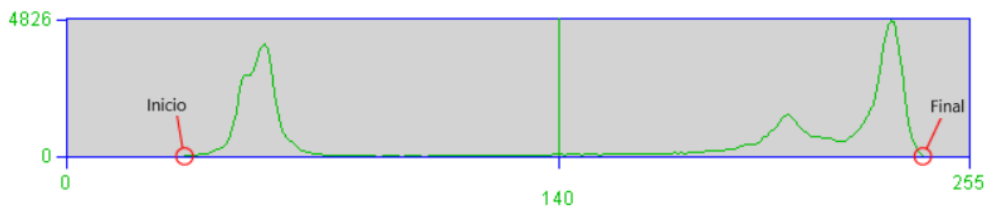
y buscarlo en otras imágenes. El proceso de búsqueda de patrones consta de dos fases: entrenamiento y búsqueda. En la fase de entrenamiento, se identifica y extrae manualmente una región que contiene el patrón a localizar. En la fase de búsqueda, el sistema examina nuevas imágenes en busca de posiciones que presenten la máxima similitud con el patrón. Las posiciones de coincidencia local se ordenan en función de la similitud, y se informan las mejores respuestas que superan un nivel mínimo específico de similitud [10]. En la figura 2.16, se observa en la parte superior el patrón definido y en la parte inferior la detección de las piezas que coinciden con dicho patrón.



**Figura 2.16:** Técnica de detección de patrones. Patrón en la parte superior e imagen buscada en parte inferior [10].

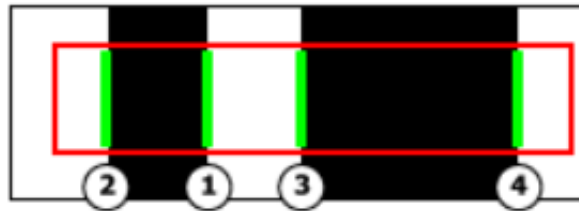
Las herramientas de visión para la detección de defectos emplean análisis avanzados de coincidencia de patrones para verificar la presencia o ausencia de imperfecciones. Esta técnica es capaz de detectar pequeños defectos basándose en variaciones de intensidad de píxeles, sin necesidad de un modelo previamente entrenado. Está diseñada para identificar defectos como rayones, mellas, rasgaduras, manchas o astillas, tanto en imágenes en escala de grises como en color [36]

La herramienta de histograma permite identificar, dentro de una región de interés (ROI), la cantidad de píxeles y sus valores individuales en la escala de grises. A partir de esta herramienta, es posible aplicar funciones para contar píxeles con fines de análisis estadístico y clasificación de características [11]. En la figura 2.17 se presenta la técnica de histograma.



**Figura 2.17:** Técnica de histograma. El eje X representa la escala de grises (0 a 255), el eje Y representa el número de píxeles [11].

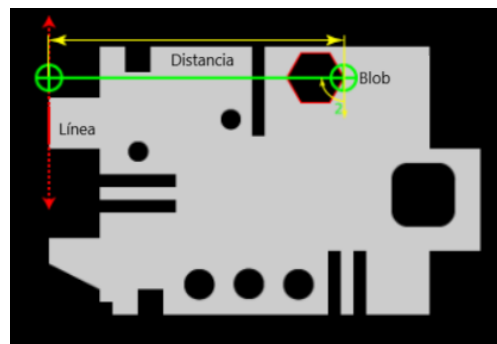
También se puede utilizar la técnica de márgenes. Un margen se define como el límite (ya sea una línea, un arco o un círculo) entre dos grupos de píxeles adyacentes con valores de escala de grises contrastantes. Las herramientas de márgenes se emplean para detectar y procesar estadísticas sobre los márgenes identificados. Es posible ubicar márgenes, medir el ancho entre los bordes y calcular el espaciado entre pares de bordes. Además, se pueden identificar en las imágenes diferencias entre márgenes, las cuales pueden considerarse defectos o espacios [12]. En la figura 2.18 se presenta la detección de márgenes entre dos columnas.



**Figura 2.18:** Detección de márgenes entre píxeles. Se muestran 4 márgenes detectados [12].

Otra herramienta utilizada en la inspección es la de bordes avanzados, que mide la ubicación de los bordes, el espaciado entre pares de bordes y el ancho de los mismos. Esta herramienta permite determinar la presencia de defectos o espacios en los bordes, y proporciona información detallada sobre las ubicaciones precisas de las características de los objetos en las imágenes, utilizando una serie de calibradores dentro de la región de interés. Se detectan picos de bordes y se examinan los bordes encontrados para identificar desviaciones, defectos o huecos [37].

Por último, las herramientas de medición permiten calcular distancias y ángulos entre círculos, puntos y líneas. Entre sus funciones, se incluye medir la distancia mínima o máxima entre los límites de dos blobs, así como entre el límite de un blob y una línea (figura 2.19). Además, es posible calcular la distancia mínima entre dos círculos, determinar la intersección de dos líneas y calcular el ángulo definido por dos puntos [13].



**Figura 2.19:** Medición de distancia entre blob y línea. [13].



# Capítulo 3

## Metodología

Para el desarrollo del proyecto y la definición de una solución adecuada al problema planteado, se utilizó la metodología propuesta por Ulrich y Eppinger. Es importante señalar que se trata de un proceso iterativo, lo que permite retroceder a etapas anteriores en cualquier momento para realizar correcciones necesarias. Esta metodología de diseño en ingeniería facilitó el desarrollo del producto a través de diversas etapas [38].

Por medio de estas etapas, se identificaron las necesidades y especificaciones, así como las métricas y valores objetivo. Se llevó a cabo la conceptualización de ideas, la selección y evaluación de conceptos, y se diseñaron pruebas de validación. A continuación, se presentan en detalle cada una de las etapas, esclareciendo todo el proceso de diseño realizado en el proyecto.

### 3.1. Descripción del proceso actual

Las PCBs son utilizadas por el cliente en aplicaciones de estética, salud, veterinaria, entre otras. Gener8 diseña las tarjetas en Estados Unidos, las fabrica a través de terceros en el extranjero y las recibe en Costa Rica para su revisión de funcionalidad y configuración.

La empresa recibe 25 tipos diferentes de tarjetas en lotes de 100 a 200 unidades. Para cada tipo de tarjeta, existe una guía de pruebas que incluye instrucciones sobre la medición de tensiones, el encendido de LEDs y la inspección visual. Todas las pruebas de las PCBs son realizadas por un operario, quien sigue las instrucciones específicas para cada tarjeta y completa un registro con los resultados obtenidos en cada aspecto revisado.

Al recibir un lote de tarjetas, el primer paso consiste en el grabado láser del número serial (S/N) de Gener8 en cada una. Este proceso implica colocar las tarjetas una por una en la máquina láser, y, una vez grabadas, se trasladan a otro estante para la siguiente prueba. Para el operario, esto requiere abrir y cerrar constantemente la puerta vertical de la máquina láser.

Una vez finalizado el grabado del número de serial(S/N) de Gener8, se procede a la revisión

visual de las tarjetas. Esta revisión tiene como objetivo detectar la falta de componentes, daños por soldadura, pines torcidos, entre otros. En términos generales, los componentes se inspeccionan en el siguiente orden: pines, soldaduras en circuitos integrados y elementos soldados manualmente. La inspección visual no tiene un tiempo reglamentado, lo que provoca que los tiempos de revisión varíen entre operarios. Además, el agotamiento de los trabajadores tras horas de observación continua puede afectar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

A continuación, se conecta la tarjeta al dispositivo de prueba para tomar datos de tensión con un multímetro y verificar el encendido de los LEDs. Todos los resultados se registran manualmente, asegurando que las tensiones y los LEDs indiquen los valores apropiados para cada medición. Finalmente, se configura la tarjeta y se marca con el número de serie del cliente. Cada uno de estos pasos se aplica a cada tarjeta, lo que puede llevar entre 5 y 20 minutos por unidad.

Una de las tarjetas más demandadas y valiosas en la empresa es la 98 L, que tiene un costo de \$900 por unidad y un tiempo promedio de prueba de 13 minutos. De este tiempo, 1 minuto y 30 segundos corresponde a la revisión visual. Para lotes de 200 tarjetas, el proceso de revisión puede demorar hasta 43 horas, de las cuales 5 horas son dedicadas a la revisión visual. En la figura 3.1 se muestra la tarjeta 98 L en condiciones óptimas, mientras que en la figura 3.2 se presenta una tarjeta con anomalías por soldadura detectadas. El fallo está señalado en un cuadro rojo en la tarjeta completa, y se incluye un acercamiento en la parte inferior derecha de la imagen, donde la anomalía se destaca en un círculo rojo.

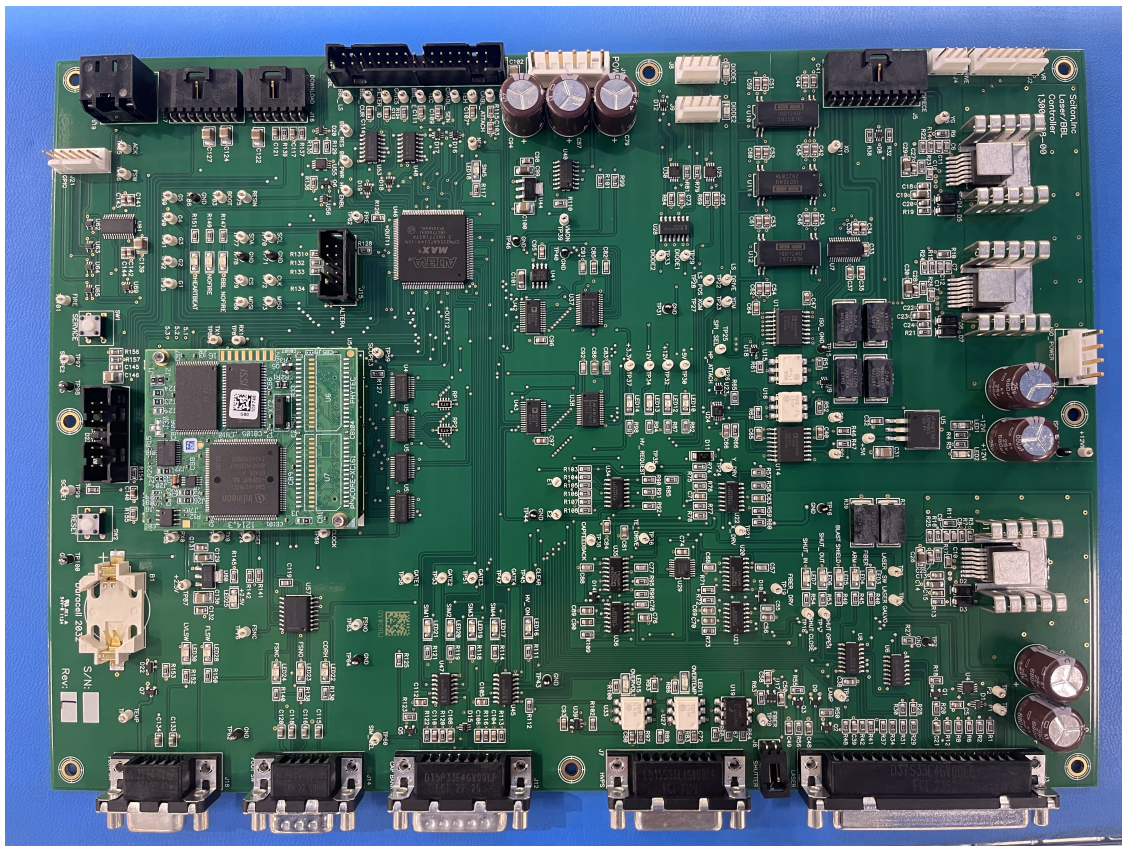


Figura 3.1: PCB con mayor demanda en la empresa.

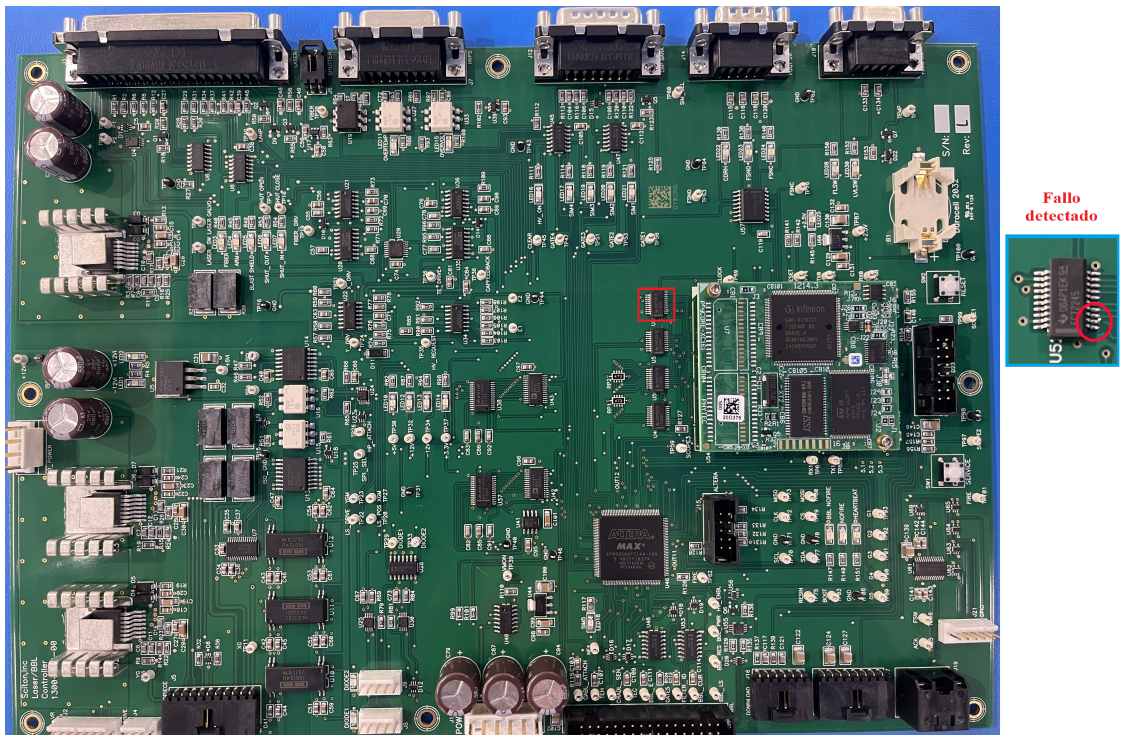


Figura 3.2: PCB 98 L con anomalía por soldadura detectada.

## 3.2. Identificación de necesidades y especificaciones del cliente

Para identificar las necesidades y especificaciones del cliente, se llevó a cabo una comunicación directa con los operarios encargados del proceso. A partir de las necesidades identificadas, se definieron las especificaciones y métricas que permiten verificar el cumplimiento de los objetivos. A continuación, se detallan estos subprocesos.

### 3.2.1. Procesado de la información

La información recopilada a partir de la comunicación con el cliente fue analizada y procesada para identificar las necesidades. En colaboración con el cliente, se acordó que, al ser esta una primera iteración, la detección de anomalías se delimitaría a la tarjeta de mayor demanda. Esta PCB es la de mayor tamaño y requiere el mayor tiempo de revisión.

Aunque se pueden identificar aproximadamente 25 tipos de anomalías en la tarjeta 98 L, se decidió, en colaboración con el cliente, centrar la atención en las tres fallas más comunes, dado que se trata de una primera iteración y se dispone de tiempo limitado. Estas fallas son: bolas de soldadura, pines torcidos y cortos por puentes.

En la figura 3.3, indicado con un cuadrado rojo, se observa un fallo por bolas de soldadura, donde esta se presenta entre dos patillas del componente, lo que puede provocar un corto al energizar la PCB. En la figura 3.4, el cuadro rojo señala una anomalía causada por exceso de soldadura, que también puede resultar en un corto al permitir el contacto entre dos patillas del componente. Finalmente, en la figura 3.5, se muestra el fallo de una tarjeta debido a pines torcidos; este problema se indica dentro del cuadro rojo de la imagen, donde se puede ver que el último pin presenta una inclinación en comparación con los demás.

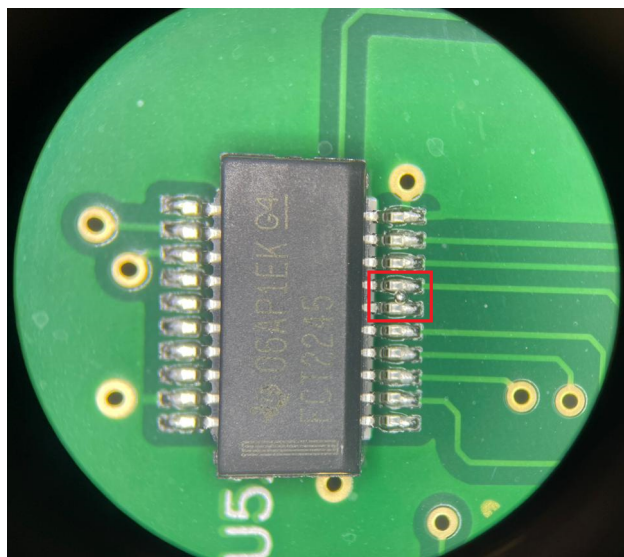
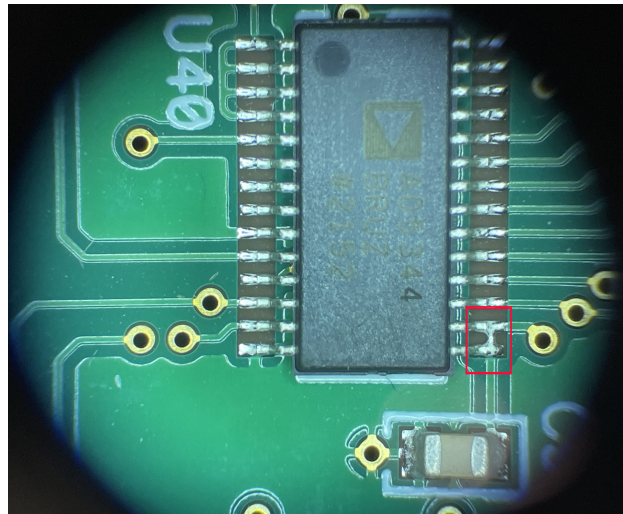


Figura 3.3: PCB 98 L con fallo por bolas de soldadura.



**Figura 3.4:** PCB 98 L con cortos por puentes de soldadura.



**Figura 3.5:** PCB 98 L con pines torcidos.

Tomando en cuenta los acuerdos con el cliente y la información proporcionada, se presenta la siguiente lista con las necesidades definidas:

1. El sistema por desarrollar reduce los errores en la inspección visual realizada por el operario.
2. El sistema por desarrollar genera un reporte de fallos encontrados.
3. El sistema por desarrollar reduce el tiempo de inspección de cada tarjeta.

4. El sistema por desarrollar permite el ajuste de tamaño para utilizar otras tarjetas.
5. El sistema por desarrollar detecta posibles cortos en los componentes debidos a los fallos en la soldadura.
6. El sistema por desarrollar detecta pines torcidos.
7. El sistema por desarrollar es económicamente factible.
8. El sistema por desarrollar posee las dimensiones adecuadas para la zona de trabajo y las tarjetas.
9. El sistema por desarrollar es resistente al peso de las tarjetas y manipulación diaria.
10. El sistema por desarrollar posee una interfaz amigable con el usuario.
11. El sistema por desarrollar contempla la seguridad laboral para el operario.

Se considera cada una de las necesidades planteadas son propias del alcance establecido para el proyecto, ya que se ligan directamente con los objetivos planteados y el enfoque de la solución.

### 3.2.2. Jerarquización de las necesidades

A partir de la definición de las necesidades, se llevó a cabo una jerarquización, identificando tanto las necesidades generales como las específicas. A continuación, se presenta una lista de las necesidades generales, acompañada de sublistas que detallan las necesidades específicas correspondientes.

- El sistema por desarrollar detecta posibles cortos en los circuitos integrados debidos a los fallos en la soldadura.
- El sistema por desarrollar detecta pines torcidos.
- El sistema por desarrollar reduce el tiempo de inspección de cada tarjeta.
  - El sistema por desarrollar reduce los errores en la inspección visual realizada por operario.
  - El sistema por desarrollar genera un reporte de fallos encontrados.
  - El sistema por desarrollar posee una interfaz amigable con el usuario.
- El sistema por desarrollar es resistente al peso de las tarjetas y manipulación diaria.
  - El sistema por desarrollar permite el ajuste de tamaño para utilizar otras tarjetas.
  - El sistema por desarrollar posee las dimensiones adecuadas para la zona de trabajo y las tarjetas.
- El sistema por desarrollar es económicamente factible.
- El sistema por desarrollar contempla la seguridad laboral para el operario.

### 3.2.3. Categorización de las necesidades

Cada necesidad está asociada a un valor de importancia, el cual se obtuvo a partir de una encuesta aplicada al cliente, en la que este indicó el nivel de relevancia que asigna a cada necesidad detectada. La información recopilada se utiliza para priorizar el desarrollo de las características más importantes según el cliente. La tabla 3.1 presenta la escala de importancia que se utilizó durante el proceso de diseño.

**Tabla 3.1:** Escala para la categorización de las necesidades.

Valor	Descripción
1	Es indeseable
2	No es importante
3	Es deseable
4	Es importante
5	Es imprescindible

A partir de las respuestas del cliente, en la tabla 3.2 se presentan las necesidades con su categorización.

**Tabla 3.2:** Categorización de las necesidades.

Número	Necesidad	Importancia
1	El sistema por desarrollar reduce los errores en la inspección visual realizada por el operario.	5
2	El sistema por desarrollar genera un reporte de fallos encontrados.	3
3	El sistema por desarrollar reduce el tiempo de inspección de cada tarjeta.	5
4	El sistema por desarrollar permite el ajuste de tamaño para utilizar otras tarjetas.	4
5	El sistema por desarrollar detecta posibles cortos en los componentes debidos a los fallos en la soldadura.	5
6	El sistema por desarrollar detecta pines torcidos.	3
7	El sistema por desarrollar es económicamente factible.	4
8	El sistema por desarrollar posee las dimensiones adecuadas para la zona de trabajo y las tarjetas.	4
9	El sistema por desarrollar es resistente al peso de las tarjetas y manipulación diaria.	5
10	El sistema por desarrollar posee una interfaz amigable con el usuario.	4
11	El sistema por desarrollar contempla la seguridad laboral para el operario.	5

### 3.2.4. Definición de especificaciones

Con el fin de comprender mejor las necesidades del cliente y alcanzar una solución que las satisfaga, se definió un conjunto de especificaciones que representan los atributos que debe

cumplir el sistema diseñado. Estas especificaciones son precisas y medibles..

### Elaboración de lista de métricas

Las especificaciones describen de manera medible lo que el sistema debe lograr para satisfacer las necesidades del cliente. Cada especificación incluye una métrica de desempeño y un rango de valores dentro del cual debe situarse esa métrica para que se considere que se cumple el objetivo.

De este modo, se estableció un conjunto de métricas que reflejan la relación directa con las diferentes necesidades del cliente. En la tabla 3.3 se presentan las métricas, su relación con las necesidades, así como su importancia relativa y las unidades de medición correspondientes.

**Tabla 3.3:** Lista de Métricas

Métrica Número	Número de necesidad	Métrica	Unidades
1	5, 6	Detección de fallos en tarjetas	Binario
2	1	Reducción de errores en la inspección visual	Porcentaje
3	2	Notificación de fallos encontrados	Binario
4	3	Disminución del tiempo de detección	Segundos
5	4	Capacidad para distintos tamaños de tarjetas	Lista
6	6	Desviación de pines	Porcentaje
7	7	Costo de inversión	Dolares
8	8	Tamaño de sistema	Metros
9	9	Peso máximo de equipo a soportar	Newton
10	10	Facilidad de uso	Subjetivo
11	11	Nivel de riesgo	Lista

### Búsqueda de información

La mayoría de los valores de las especificaciones fueron asignados en base a la información proporcionada por el cliente. Por ejemplo, para la métrica 5, relacionada con la capacidad del sistema para adaptarse a distintos tamaños de tarjetas, se determinaron algunas de las dimensiones a las que el sistema debe poder ajustarse. Sin embargo, para otras especificaciones fue necesario investigar el estado actual de la industria, con el fin de obtener una referencia clara y establecer valores que satisfagan las necesidades planteadas y sean alcanzables dentro del alcance del proyecto.

Para definir los valores objetivo en la métrica 6, relacionada con la desviación de pines, se revisó lo establecido en la norma IPC-A-610. Esta norma indica que para que la desviación del pin sea considerada aceptable, debe ser del 50 % o menos del espesor del pin [2]. En cuanto a la métrica 9, asociada al peso máximo del equipo, se investigaron los límites ergonómicos para la manipulación de cargas en mujeres y hombres. Se determina que la carga no debe

superar los 20 kg para hombres jóvenes y mujeres, mientras que en el caso de hombres mayores, no se deben levantar más de 55 kg [39].

Por otro lado, para la métrica número 7, que corresponde al costo de inversión para el desarrollo del proyecto, se tomaron en cuenta proyectos similares en la industria y el presupuesto disponible del cliente. Dado que los precios en el mercado varían ampliamente según múltiples factores, como el campo de visión requerido, la cantidad de cámaras y la cantidad de luces, se considerará el presupuesto del cliente, priorizando las necesidades y requerimientos establecidos.

Finalmente, para la métrica 12, relacionada con el nivel de riesgo, se investigaron diversas técnicas de evaluación de riesgo laboral, tales como la técnica de cinco porqués, el diagrama de interrelaciones, el método Delphi, el método FINE y el método AMFE. A partir de esta revisión, se establece que, para una seguridad laboral óptima, se espera un nivel de riesgo bajo o muy bajo [40].

### Definición de valores objetivo

Con base en la información recolectada durante la identificación de necesidades y especificaciones del cliente, la Tabla 3.4 presenta la lista de métricas junto con sus respectivos valores, incluyendo tanto los valores ideales como los valores marginalmente aceptables.

**Tabla 3.4:** Valores objetivo

Métrica numero	Métrica	Unidades	Valor Marginal	Valor Ideal
1	Detección de fallos en tarjetas	Binario	Cumple	Cumple
2	Reducción de errores en la inspección visual	Porcentaje	>80	>100
3	Notificación de fallos encontrados	Binario	Cumple	Cumple
4	Disminución del tiempo de detección	Segundos	<90	<60
5	Capacidad para distintos tamaños de tarjetas	Lista	305 mm x 215 mm 254 mm x 155 mm 109 mm x 60 mm	30.5 mm x 215 mm 254 mm x 155 mm 109 mm x 60 mm
6	Desviación de pines	Porcentaje	<50	<10
7	Costo de inversión	Dólares	< \$ 40000	\$ 35000
8	Tamaño de sistema	m <sup>2</sup>	< 1	<0.25
9	Carga máxima de equipo a soportar	Kilogramo	<55	<55
10	Facilidad de uso	Subjetivo	[7,10]	[9,10]
11	Nivel de riesgo	Lista	Bajo Muy bajo Alto Muy alto Medio	Bajo Muy bajo

Como se observa en la tabla 3.4, a partir de la búsqueda de información se han establecido los valores marginales e ideales para las métricas 6, 9 y 11. En el caso de las métricas con

unidades binarias, se asigna un valor marginal e ideal de “cumple”, lo que permite verificar la presencia o ausencia de cada función en el producto.

En cuanto a las métricas de carácter subjetivo, su evaluación se basa en las experiencias de los usuarios. Esto se debe a que se busca analizar aspectos no cuantificables de la interacción de los usuarios con el sistema que se está desarrollando. Se mide en una escala del uno al diez, donde los valores ideales son nueve y diez.

Para las métricas 8, 4, 5 y 1, los valores ideales y marginales se determinaron a partir de observaciones realizadas en la empresa y de reuniones con el cliente. Por ejemplo, para la empresa, lograr un tiempo de inspección visual inferior al promedio actual (1 minuto y 30 segundos) se considera el cumplimiento de la métrica 4.

### 3.3. Conceptualización del proceso de diseño

En esta sección, se propone descomponer el problema identificado en subproblemas, con el objetivo de comprenderlo en profundidad y definir el camino a seguir para su solución. Además, se llevó a cabo una investigación de conceptos tanto externos como internos que permitan definir la forma de abordar cada subproblema, contribuyendo así a la solución del problema planteado. Por último, se generan las diversas alternativas de solución y se analiza cuál de ellas se ajusta mejor a los objetivos establecidos del proyecto.

#### 3.3.1. Descomposición funcional

Se elaboró un diagrama de caja negra con el propósito de representar las entradas y salidas del sistema, incluyendo tanto las señales como el material. En la figura 3.6, se presenta el diagrama de caja negra del problema. En este diagrama, las líneas continuas gruesas indican la trayectoria del material dentro del sistema, mientras que las líneas discontinuas representan las señales de control que afectan al mismo.

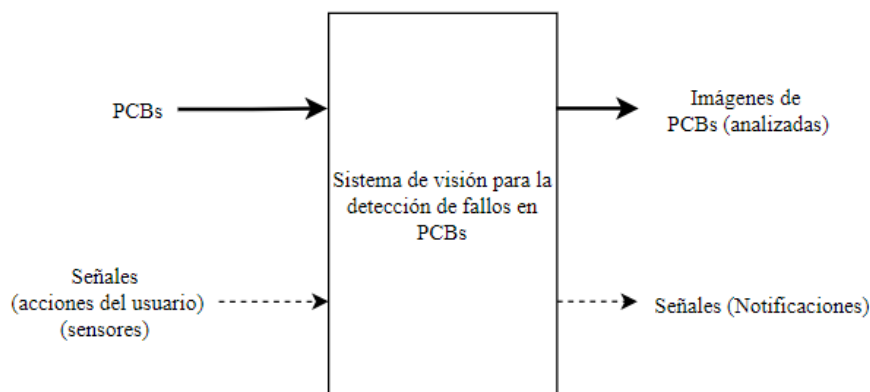
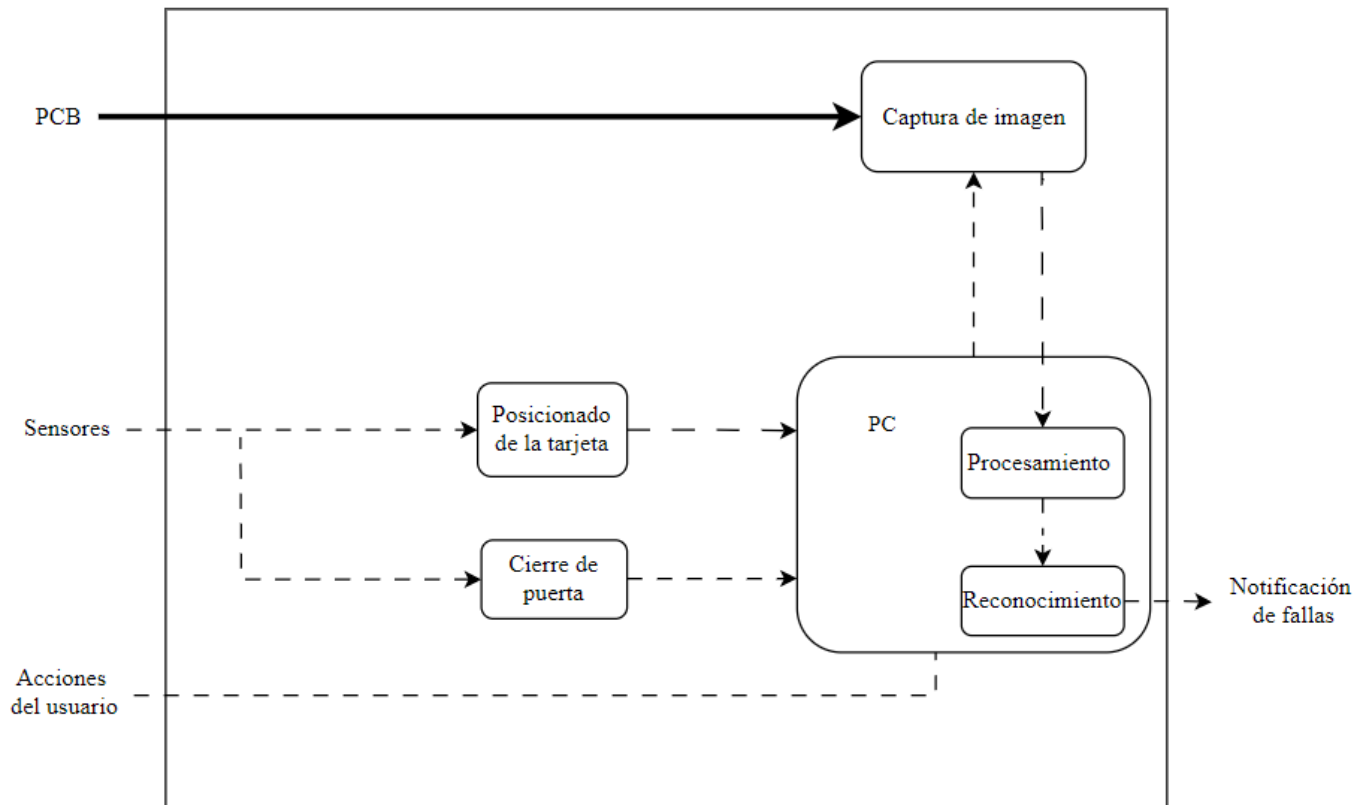


Figura 3.6: Representación caja negra. Elaboración propia

Como se aprecia en el diagrama de caja negra anterior, se establece como una entrada al sistema los sensores y las acciones del usuario, los cuales permiten ir verificando el cumplimiento del proceso o bien realizar configuraciones. El material corresponde a las PCBs y la salida es una imagen de la tarjeta analizada. Además, como salida hay notificaciones del funcionamiento del dispositivo y resultados del análisis.

A partir de este diagrama de caja negra, se elaboró una descripción más detallada de los elementos que intervienen en la función del sistema. Se llevó a cabo una descomposición funcional que divide el problema en subproblemas más simples y muestra como interactúan entre sí. A cada uno de estos subproblemas será necesario asociar una solución particular. La representación de esta descomposición se muestra en el diagrama de la figura 3.7.



**Figura 3.7:** Descomposición funcional del problema. Elaboración propia.

En la descomposición funcional, se establece que la entrada es la PCB a la que se le tomará una imagen, y la salida del sistema corresponde a la notificación de fallas en la imagen capturada. La entrada de los sensores incluye interruptores de cierre de puerta y sensores de posicionamiento de tarjeta, que permiten determinar el estado del proceso y ejecutar las acciones de captura y análisis sin interrumpirlo. Por otro lado, las señales de las acciones del usuario permiten iniciar o detener el sistema.

## 3.4. Búsqueda y selección de conceptos

Para cada uno de los subproblemas o subfunciones planteadas, se realizó una búsqueda interna y externa de conceptos. Las fuentes consultadas incluyen diversos mercados, artículos científicos, la experiencia personal, así como los conocimientos de los ingenieros de la empresa y académicos del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

A partir de esta búsqueda, se determinaron posibles soluciones para cada subfunción, seleccionando aquella que cumplía con los objetivos establecidos para el proyecto. Una vez finalizada la selección de conceptos, se obtuvo un conjunto de elementos que conforman la solución final.

Se presenta, para cada subfunción, el método utilizado en el proceso de selección. Dado que se trata de un sistema de visión, se consideran también la iluminación, una estructura que separa el entorno y el soporte para todos los elementos.

### 3.4.1. Iluminación

Para la selección del tipo de iluminación, se tomó en cuenta la industria de sistemas de visión, que ofrece catálogos de luces adaptadas a las necesidades específicas de estos sistemas [41] [14]. Se definieron los siguientes criterios de selección: claridad de la imagen, optimización del contraste, brillo, simplificación del proceso de tratamiento posterior, mitigación de anomalías ópticas y tamaño. A continuación, se describen estos criterios de selección en detalle [32][28]:

- Claridad de la imagen: mejora del contraste que afecta únicamente a los tonos medios de la fotografía.
- Optimización del contraste de la imagen: se refiere a la diferencia entre el tono más negro y el más blanco en una imagen. Cuanto mayor sea esta diferencia tonal, mayor será el contraste.
- Brillo adecuado en la imagen: ajuste óptimo de la luminosidad.
- Simplificación del proceso de tratamiento posterior de la imagen: resultados que evitan la necesidad de aplicar filtros u otros trabajos previos al análisis del sistema.
- Mitigación de anomalías ópticas: reducción de problemas como el deslumbramiento, las sombras y la aberración cromática, lo que permite obtener imágenes más precisas y confiables.
- Tamaño: debe ajustarse a las dimensiones del sistema.

Además, se determinó que la reflexión difusa es el tipo de iluminación más útil, ya que permite visualizar las anomalías en las PCBs, que presentan una superficie plana con componentes de distintos tamaños [32][28]. La iluminación necesaria debe abarcar un espacio máximo de 305 mm x 215 mm, que corresponde a las dimensiones de la tarjeta a inspeccionar. Se propone utilizar luz blanca, dado que las imágenes serán monocromáticas.

Cada uno de los conceptos se evalúa según la aplicación requerida y las hojas técnicas de diversas empresas de sistemas de visión [41] [14]. Se llevó a cabo un primer filtrado de los conceptos seleccionados. Para ello, se utilizó una tabla con los criterios de selección

establecidos, eligiendo uno de los conceptos como referencia y asignándole un valor de cero (0) en todos los criterios. A los demás conceptos se les asigna un más (+) o un menos (-) en cada criterio, según su adecuación al proyecto en relación con la referencia. Tras sumar los valores positivos, ceros y negativos de cada concepto, se clasifican en tres categorías: no continúan, se revisan o continúan.

En la tabla 3.5 se presenta el filtrado de los tipos de iluminación candidatos: anillo de luz, luz domo, barras de luz, luz cuadrada y luz coaxial, tomando como referencia la luz domo.

**Tabla 3.5:** Filtrado de conceptos para subfunción de iluminación.

Criterios de selección	Conceptos				
	Anillo de luz	Luz Domo (Referencia)	Barras de luz	Luz Cuadrada	Luz Coaxial
Claridad de la imagen	0	0	-	-	0
Optimiza contraste de la imagen	+	0	0	+	+
Simplifica del proceso de tratamiento posterior de la imagen	+	0	-	-	+
Brillo generado en la imagen	+	0	-	+	0
Mitiga Anomalías Ópticas	-	0	-	-	0
Tamaño	+	0	+	+	-
Suma +	4	0	1	3	2
Suma 0	1	0	1	0	3
Suma -	0	0	4	3	1
<b>Evaluación Neta</b>	+4	0	-3	0	+1
<b>Lugar</b>	1	3	4	3	2
<b>Continua</b>	Si	Revisar	No	Revisar	Si

A partir de la tabla 3.5, se observa que el concepto con mayor puntuación es el uso de iluminación de anillo de luz, seguido de la luz coaxial. Además, la luz domo y la luz cuadrada obtuvieron la misma puntuación, por lo que se combinan estos conceptos para dar lugar a un tipo de iluminación conocido como Domo Difuso.

Una vez realizado el filtrado, se realizó la fase de evaluación de los conceptos seleccionados, que es más específica y busca determinar un concepto ganador. Se asigna un peso a cada criterio, basado en la información recopilada sobre iluminaciones en sistemas de visión y su aplicación para el proyecto.

Se utiliza una tabla para listar los criterios de selección. Para cada concepto, se asigna una puntuación del 1 al 5 en cada criterio, donde 1 representa la menor puntuación y 5 la mayor. Esta calificación se realiza a partir de la búsqueda de información, criterios propios y consultas con los ingenieros de la empresa. La puntuación se promedia según el peso de cada criterio. Al sumar las evaluaciones ponderadas de cada concepto, se obtiene una puntuación

total que permite seleccionar el concepto ganador. En la tabla 3.6 se muestra la evaluación de los conceptos de iluminación.

**Tabla 3.6:** Evaluación de conceptos para la subfunción de iluminación.

Criterios de selección	Peso (%)	Conceptos					
		Anillo de luz		Luz coaxial		Domo Difuso	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Claridad de la imagen	20	5	1	1	0,2	4	0,8
Optimiza contraste de la imagen	10	4	0,4	2	0,2	5	0,5
Simplifica del proceso de tratamiento posterior de la imagen	10	5	0,5	1	0,1	3	0,3
Brillo generado en la imagen	20	5	1	3	0,6	4	0,8
Tamaño	15	5	0,75	1	0,15	3	0,45
Mitiga Anomalías Ópticas	25	3	0,75	4	1	5	1,25
<b>Total de puntos</b>	100		4.4		2.25		4.1
<b>Lugar</b>		1		3		2	
<b>Continua</b>		Si		No		No	

Como se aprecia en la tabla 3.6, el concepto ganador es el anillo de luz. Es importante aclarar que este tipo de iluminación ofrece opciones que permiten iluminar superficies de diversos tipos, incluidas las brillantes. Siguiendo la guía de los catálogos de la industria, se determina que se puede utilizar la iluminación tipo anillo de luz difuso multiángulo.

### 3.4.2. Estructura de montaje y toma de imágenes

Para seleccionar la estructura de montaje y captura de imágenes, se consideran las siguientes partes esenciales: el contenedor, la puerta, la manija de apertura y cierre, la sujeción de elementos y el posicionamiento de las tarjetas. A partir de una investigación interna y externa, se identificaron diversas opciones para cada una de estas partes y se generaron combinaciones que pueden cumplir con el objetivo planteado..

Como parte del contenedor que evita el contacto de las PCBs con el entorno, se identificaron estructuras metálicas o plásticas que impiden el ingreso de luz natural y que pueden fabricarse según el tamaño de los elementos a estudiar. Además, se considera que el peso del material debe respetar los valores de carga establecidos para hombres y mujeres.

La manija de apertura y cierre es una parte importante de la estructura, ya que afecta el flujo del proceso de ingreso y retiro del material a trabajar. Por ello, debe ser ergonómica y de rápido accionamiento. Se encontraron manijas con cierre de semigiros, como las utilizadas en gaveteros industriales. Otra opción es el uso de botones pulsadores o picaportes de

acción deslizante, como los empleados en casilleros. Por último, se plantea el uso de cierres magnéticos, que solo requieren ser empujados o jalados según se desee abrir o cerrar.

Por otro lado, la sujeción de elementos como la cámara o las luces debe ser firme y funcional para el objetivo de captura de imágenes de las PCBs. La investigación sobre la sujeción de la cámara indica que es común el uso de placas metálicas unidas a la estructura mediante tornillería, lo que proporciona una posición fija con un ángulo que puede variar entre 90° y 180°, según el diseño de la pieza y las necesidades del usuario. Otra alternativa de sujeción consiste en una base con un tornillo lateral para ajustar la cámara, lo que permite un ligero cambio de posición hacia adelante o atrás, manteniendo una ubicación fija en el techo de la estructura. También se plantea el uso de una pieza con dos placas unidas en forma de bisagra (articulada), que permite un movimiento de la placa de hasta 180° y se ajusta a la estructura y la cámara mediante tornillos. Por último, se ha encontrado un sistema articulado que consiste en una placa conectada al techo mediante tornillos, un tubo que proporciona la longitud deseada y, al final, una pieza de agarre circular. Esta pieza incluye un tornillo que ajusta la zona circular, permitiendo cambiar el ángulo de la cámara y ofreciendo un movimiento de 360°. La sujeción de las luces se plantea con placas metálicas o plásticas, de forma que la mantengan fija y no generen sombras en la pieza a visualizar.

Para el posicionamiento de las tarjetas se identificaron cuatro opciones. La primera consiste en la activación de actuadores lineales que desplazan la tarjeta a una posición deseada, controlada por sensores de presión. La segunda opción implica el uso de un sistema de resortes. La tercera opción utiliza motores a cada lado de las tarjetas, que mueven la tarjeta hasta su posición final, también controlada por sensores. La cuarta opción propone el uso de moldes 3D específicos para cada tipo de tarjeta, combinados con una base que tiene agujeros para atornillarla, asegurando que la tarjeta esté correctamente colocada mediante un sensor. La última opción mencionada ya ha sido utilizada en la empresa, específicamente en la máquina de grabado láser. Tras conversaciones con el cliente, se ha decidido que será la opción a utilizar. Este método ofrece a los operarios una mayor seguridad, es altamente duradero y reduce el costo de la inversión final al requerir menos componentes en comparación con las otras alternativas.

Con respecto a la puerta, tras realizar una búsqueda interna y externa, se identificaron varias opciones: una puerta de apertura lateral, una puerta de apertura superior, una puerta corrediza y dos puertas de apertura lateral. Después de conversar con el cliente, se decidió utilizar la opción de dos puertas con apertura lateral, ya que ofrece a los operarios mayor amplitud para colocar o retirar las tarjetas, además de facilitar su apertura y cierre.

A partir de la información recopilada y las decisiones tomadas con el cliente, se empleó el criterio personal y el apoyo de los ingenieros de la empresa para formular cuatro conceptos como posibles soluciones al subproblema de la estructura. A continuación, se presentan los conceptos planteados:

#### Concepto A

- Estructura metálica rectangular.
- Dos puertas de apertura lateral.

- Manija para gaveta.
- Soporte de cámara: tornillos fijados directamente a la cámara, conectados a una placa colocada a 0°.
- Sujeción de las tarjetas: lámina con agujeros junto con soporte impreso en 3D.

#### Concepto B

- Estructura plástica cuadrada.
- Dos puertas de apertura lateral.
- Manija para gaveta.
- Soporte de cámaras: base con un tornillo lateral para ajustar la cámara hacia delante y hacia atrás.
- Sujeción de las tarjetas: lámina con agujeros junto con soporte impreso en 3D.

#### Concepto C

- Estructura plástica rectangular
- Dos puertas de apertura lateral.
- Botón pulsador de cierre.
- Soporte de cámaras: tornillos directos a la cámara con placa articulada hasta 180°.
- Sujeción de las tarjetas: lámina con agujeros junto con soporte impreso en 3D.

#### Concepto D

- Estructura metálica cuadrada.
- Dos puertas de apertura lateral.
- Picaporte.
- Soporte de cámaras: pieza articulada con agarre circular (360°).
- Sujeción de las tarjetas: lámina con agujeros junto con soporte impreso en 3D.

Para la selección de la estructura, se establecen los siguientes criterios: precio, tamaño, facilidad de apertura y cierre, resistencia del material, posicionamiento de la cámara, colocación de las tarjetas y estética. A continuación, se describen estos criterios [42]:

- Precio: costo de la estructura.
- Tamaño: dimensiones de la estructura.
- Facilidad de apertura y cierre: comodidad del operario al introducir o retirar las tarjetas a inspeccionar.
- Resistencia del material: capacidad del material para soportar las acciones a las que estará sometido durante su vida útil.
- Posicionamiento de la tarjetas: colocación de la tarjeta en el lugar que favorece la toma de la imagen.
- Posicionamiento de la cámara: aseguramiento de la cámara en una posición que optimice la captura de la imagen.
- Estética: nivel de agrado visual en relación con su organización espacial.

Cada uno de los conceptos se evalúa según la aplicación requerida y la información técnica recopilada para cada elemento, con el objetivo de brindar las condiciones adecuadas para obtener imágenes de los distintos componentes electrónicos. Se realizó un primer filtrado

de los conceptos seleccionados. Para ello, se utilizó una tabla con los criterios de selección establecidos, eligiendo uno de los conceptos como referencia y asignándole un valor de cero (0) en todos los criterios. A los demás conceptos se les asigna un cero (0), un más (+) o un menos (-) en cada criterio, según su adecuación al proyecto en relación con la referencia. Tras sumar los valores positivos, ceros y negativos de cada concepto, se clasifican en tres categorías: no continúan, se revisan o continúan. En la tabla 3.7 se presenta el filtrado de los conceptos. Se toma como referencia el concepto C.

**Tabla 3.7:** Filtrado de conceptos para la subfunción de estructura.

Criterios de selección	Conceptos			
	Estructura A	Estructura B	Estructura C (Referencia)	Estructura D
Precio	-	0	0	-
Tamaño	0	-	0	-
Facilidad de apertura y cierre	0	0	0	-
Resistencia del material	+	0	0	+
Soporte de elementos	+	-	0	0
Estética	0	-	0	-
Posición de las tarjetas	0	0	0	0
Suma 0	4	4	0	2
Suma -	1	3	0	4
Suma +	2	0	0	1
<b>Evaluación Neta</b>	1	-3	0	-3
<b>Lugar</b>	1	3	2	3
<b>Continua</b>	Si	No	Si	No

En la tabla 3.8 se observa que los conceptos que continuaron fueron la Estructura A y la Estructura C. Estos candidatos avanzaron a la fase de evaluación, que es más específica y busca determinar un concepto ganador. A cada criterio se le asignó un peso, basado en la información recopilada sobre estructuras en sistemas de visión y su aplicación para el proyecto.

Se utilizó una tabla para listar los criterios de selección. Para cada concepto, se asignó una puntuación del 1 al 5 en cada criterio, donde 1 representa la menor puntuación y 5 la mayor. Esta calificación se realizó a partir de la investigación de información, criterios propios y consultas con los ingenieros de la empresa. La puntuación se promedió según el peso de cada criterio. Al sumar las evaluaciones ponderadas de cada concepto, se obtuvo una puntuación total que permitió seleccionar el concepto ganador. En la tabla 3.8 se muestra la evaluación de los conceptos de la estructura.

**Tabla 3.8:** Evaluación de conceptos para subfunción de estructura.

Criterios de selección	Peso (%)	Conceptos			
		Estructura A		Estructura C	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Precio	10	3	0,3	5	0,5
Tamaño	10	5	0,5	5	0,5
Facilidad de apertura y cierre	20	5	1	5	1
Resistencia del material	15	5	0,75	2	0,3
Soporte de elementos	20	5	1	3	0,6
Estética	5	5	0,25	5	0,25
Posición de las tarjetas	20	5	1	5	1
<b>Total de puntos</b>	100		4.8		4.15
<b>Lugar</b>		1		2	
<b>Continúa</b>		Si		No	

El concepto ganador correspondió a la Estructura A, que superó a la Estructura C en los criterios de resistencia y soporte de los elementos. Ambos criterios tienen un gran peso en la evaluación, ya que brindan durabilidad al equipo, seguridad al usuario y aumentan la probabilidad de obtener buenas imágenes. Los valores específicos y detalles de las partes de la Estructura A se indicarán en la etapa de diseño, la cual deberá cumplir con lo ya establecido: material metálico, dos puertas laterales, placa de sujeción para la cámara, método manual de posicionamiento de las tarjetas, entre otros.

### 3.4.3. Cámara

La selección de la cámara implicó un análisis exhaustivo de información sobre cámaras industriales. Las marcas investigadas incluyen Cognex, Keyence, Festo, Sick, Omron, Uster, Delta, entre otras. A partir de la búsqueda interna y externa, así como de criterios personales y la consulta a ingenieros, se identificaron los posibles candidatos de cinco de las empresas consultadas.

Las opciones de cámara se seleccionaron tras calcular la resolución mínima necesaria. Para ello, se tuvo en cuenta el campo de visión (305 mm x 215 mm) y el detalle mínimo a observar (0.23 mm), lo que permitió calcular los valores necesarios de píxeles verticales y horizontales, tal como se detalla en la ecuación 3.1 y en la ecuación 3.2. Se determinó que se necesita una cámara con una resolución de 8 Mp (2840 x 2840 píxeles).

$$Píxeles\ Verticales = 2 * \left( \frac{215\ mm}{0,23\ \frac{mm}{pixel}} \right) = 1869,57\ píxeles \quad (3.1)$$

$$Píxeles\ Horizontales = 2 * \left( \frac{305\ mm}{0,23\ \frac{mm}{pixel}} \right) = 2652,17\ píxeles \quad (3.2)$$

También se consideró el tipo de sensor que ofrece mayores beneficios para la captura de

imágenes. En este caso, se optó por el sensor tipo CMOS, que produce imágenes de alta calidad, mejora el consumo energético de la cámara y presenta un costo inferior en comparación con las cámaras que utilizan sensores CCD [31]. Otro aspecto analizado fue la capacidad de cambio de la lente. Las cámaras con lentes intercambiables permiten ajustar diferentes niveles de acercamiento según lo requiera la aplicación. Se eligió un montaje tipo C, ya que es común en el mercado, lo que facilita el cambio y la disponibilidad de repuestos [28] [29].

Además, se consideró que el candidato debe permitir un campo de visión que abarque el tamaño de la tarjeta 98 L (305 mm x 215 mm). La distancia de trabajo, según lo conversado con el cliente, no debe superar los 600 mm. Por último, se identificaron los protocolos de comunicación mínimos requeridos: TCP/IP, PROFINET y EtherNet/IP, los cuales son de alta demanda [20] [43].

A continuación se describen los criterios para el filtrado y la evaluación de los conceptos [31] [30] [44]:

- Resolución: número de píxeles en la imagen, que determina el tamaño y la calidad de las imágenes.
- Sensor: dispositivo que capta la luz y la convierte en una señal que se procesa para formar la imagen digital.
- Lente: tipos de montura óptica y tamaños disponibles.
- Protocolos de comunicación: Conjunto de reglas que permite el intercambio de información entre los diferentes dispositivos de una red industrial.
- Peso: fuerza proporcional a la masa del objeto.
- Distancia de trabajo: distancia desde la parte frontal del lente hasta el objeto en inspección.
- Color de la imagen: la cámara puede ser a color o monocromática.
- Campo de visión: área bajo inspección que la cámara necesita captar.
- Precio: costo de adquisición de la cámara

Cada uno de los conceptos se evalúa según la aplicación requerida y la información técnica recopilada para cada elemento [20] [45] [43] [4] [46] [47] [48]. Se realizó un primer filtrado de los conceptos seleccionados utilizando una tabla con los criterios de selección establecidos. Se eligió uno de los conceptos como referencia y se le asignó un valor de cero (0) en todos los criterios. A los demás conceptos se les asigna un cero (0), un más (+) o un menos (-) en cada criterio, según su adecuación al proyecto en relación con la referencia. Tras sumar los valores positivos, ceros y negativos de cada concepto, se clasificaron en tres categorías: no continúan, se revisan o continúan.

En la tabla 3.9 se realizó el filtrado de los ocho conceptos, utilizando como referencia la cámara VS-C1500M de Keyence. A partir de los resultados, se identificaron los conceptos que avanzaron a la siguiente evaluación: la cámara 3801 de Cognex, la cámara IV3-600MA de Keyence y la cámara FH-SMX12 de OMRON. Los conceptos descartados no cumplían con criterios relacionados con el tipo de sensor, los protocolos de comunicación, la distancia de trabajo y la lente.

**Tabla 3.9:** Filtrado de conceptos para cámara.

Criterios de selección	Conceptos							
	Inspector85x Sick	DVM CM12MGCL Delta	3801 Cognex	9912 Cognex	IV3-600MA Keyence	VS-C1500M Keyence (Referencia)	FJ-S5MG2-S OMRON	FH-SMX12 OMRON
Resolución	+	+	+	+	+	0	-	+
Sensor	0	-	0	0	0	0	0	0
Lente	0	-	0	0	-	0	0	0
Comunicación	-	-	+	+	0	0	-	-
Peso	-	+	-	+	+	0	+	+
Distancia de trabajo	-	0	0	0	-	0	0	0
Color	0	0	0	0	0	0	0	0
Campo de visión	0	0	0	0	0	0	0	0
Precio	+	+	+	0	+	0	+	+
Suma +	2	3	3	3	3	0	2	3
Suma 0	4	3	5	0	4	9	5	0
Suma -	3	3	1	0	2	0	2	1
<b>Evaluación Neta</b>	-1	0	2	3	1	0	0	2
<b>Lugar</b>	6	5	2	1	3	4	5	2
<b>Continúa</b>	No	No	Si	Si	Si	No	No	Si

Los conceptos que continuaron se evaluaron en la tabla 3.10 para determinar el concepto ganador. Para ello, se asignó un peso a cada criterio, fundamentado en la información recopilada sobre las cámaras en sistemas de visión y su aplicación en el proyecto.

Se utilizó una tabla para listar los criterios de selección. Para cada concepto, se asignó una puntuación del 1 al 5 en cada criterio, donde 1 representa la menor puntuación y 5 la mayor. Esta calificación se realizó a partir de la investigación de información, criterios propios y consultas con los ingenieros de la empresa. La puntuación se promedió de acuerdo con el peso de cada criterio. Al sumar las evaluaciones ponderadas, se obtuvo como ganador la cámara 3801 de Cognex. Este dispositivo cuenta con 8 MP, un sensor tipo CMOS, es monocromática y tiene montura tipo C.

**Tabla 3.10:** Evaluación de conceptos para la cámara.

Criterios de selección	Peso (%)	Conceptos							
		3801 Cognex		9912 Cognex		IV3-600MA Keyence		FH-SMX12 OMRON	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Resolución	10	5	0,5	3	0,3	2	0,2	3	0,3
Sensor	10	5	0,5	5	0,5	5	0,5	5	0,5
Lente	15	5	0,75	5	0,75	5	0,75	5	0,75
Comunicación	10	5	0,5	5	0,5	3	0,3	2	0,2
Peso	5	2	0,1	3	0,15	3	0,15	5	0,25
Distancia de trabajo	15	4	0,6	5	0,75	4	0,6	3	0,45
Color	5	5	0,25	5	0,25	5	0,25	5	0,25
Campo de visión	15	5	0,75	5	0,75	5	0,75	5	0,75
Precio	15	4	0,6	2	0,3	2	0,3	5	0,75
<b>Total de puntos</b>	100		4,55		4,25		3,8		4,2
<b>Lugar</b>		1		2		4		3	
<b>Continúa</b>		Si		No		No		No	

### 3.4.4. Óptica

Como parte del sistema de visión, la selección correcta de la óptica es crucial. Se definen a continuación los criterios de selección para estas [28]:

- Montura: debe ser compatible con la montura del lente de la cámara seleccionada.
- Distancia focal: determina el ángulo de visión y, por lo tanto, el tamaño del cuadro de la escena que se proyectará como imagen.
- Formato del sensor de la cámara: se refiere al tamaño del sensor de la cámara.
- Apertura: determina la cantidad de luz que permite ingresar a la cámara y, por ende, su sensibilidad.

Al seleccionar una cámara de la marca Cognex, se requiere una lente compatible, por lo que la óptica debe ser de montura tipo C. El formato del sensor se determina a partir de las fichas técnicas de la cámara, que indican un tamaño de sensor de 2/3' con 2.74 x 2.74  $\mu\text{m}$ . En cuanto a la apertura, esta es un rango que puede variar entre ópticas, se busca el rango sea amplio.

Para definir la distancia focal requerida, se realiza el cálculo siguiendo la relación entre la distancia de trabajo, el campo de visión, la distancia focal y el tamaño del sensor. Se utiliza una distancia de trabajo de 477.3 mm, un campo de visión de 305 mm x 215 mm y un tamaño de sensor de 2.74 x 2.74  $\mu\text{m}$ . La relación mostrada en la ecuación 3.3 permite determinar una distancia focal necesaria de 12 mm.

$$\text{Longitud Focal} = \frac{\text{Distancia de trabajo}}{\text{Campo de vision}} * \text{Tamano del sensor} \quad (3.3)$$

Los candidatos seleccionados corresponden a ópticas de la marca Cognex, todas compatibles con la cámara Insight 3808. Estas se evalúan en función de la aplicación requerida y la información técnica recopilada para cada elemento. Para realizar el filtrado de los conceptos, se utilizó una tabla con los criterios de selección establecidos, eligiendo uno de los conceptos como referencia y asignándole un valor de cero (0) en todos los criterios. A los demás conceptos se les asignó un cero (0), un más (+) o un menos (-) en cada criterio, según su adecuación al proyecto en comparación con la referencia. Tras sumar los valores positivos, ceros y negativos de cada concepto, se clasificaron en tres categorías: no continúan, se revisan o continúan

En la tabla 3.11 se presenta el filtrado de los conceptos candidatos, utilizando la óptica de la serie SR como referencia. A partir del filtrado, se descartaron las ópticas de la serie UR debido a su elevado precio y a que no ofrecen un rango de apertura significativo.

**Tabla 3.11:** Filtrado de conceptos para la óptica.

Criterios de selección	Conceptos		
	SR Series (Referencia)	UR Series	HR Series
Montura	0	0	0
Distancia Focal	0	0	0
Formato Sensor	0	+	+
Precio	0	-	-
Apertura	0	-	0
Suma +	0	1	1
Suma 0	0	2	3
Suma -	0	2	1
<b>Evaluavion Neta</b>	0	-1	0
<b>Lugar</b>	1	2	1
<b>Continua</b>	Si	No	Si

Después del filtrado de conceptos, se llevó a cabo la evaluación de aquellos que continuaron en el proceso. Para ello, se asignó un peso a cada criterio, basado en la información recopilada sobre las cámaras en sistemas de visión y su aplicación en el proyecto. Se utilizó una tabla para listar los criterios de selección. A cada concepto se le asignó una puntuación del 1 al 5 en cada criterio, donde 1 representa la menor puntuación y 5 la mayor. Esta calificación se realizó a partir de la búsqueda de información, criterios propios y consultas con los ingenieros de la empresa. La puntuación final se promedió según el peso de cada criterio..

Al realizar la evaluación de los conceptos, como se muestra en la tabla 3.12, la serie SR resultó ser el concepto ganador al obtener el puntaje máximo. Estas ópticas cuentan con una lente compacta y resistente a las vibraciones, un tamaño de píxel de  $2,74 \mu\text{m} \times 2,74 \mu\text{m}$ , una apertura de f/2.2–f/16 y montura tipo C [41].

**Tabla 3.12:** Evaluación de conceptos para la óptica.

Criterios de selección	Peso (%)	Conceptos			
		SR Series		HR Series	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Montura	20	5	1	5	1
Distancia Focal	25	5	1,25	3	0,75
Formato Sensor	20	5	1	5	1
Precio	20	5	1	3	0,6
Apertura	15	5	0,75	5	0,75
<b>Total de puntos</b>	100		5		4,1
<b>Lugar</b>		1		2	
<b>Continua</b>		Si		No	

### 3.4.5. Sensor posición de tarjeta

El sensor que determinará si la tarjeta ha sido colocada correctamente en su posición será un sensor de proximidad, que se instalará en la plataforma en el espacio existente entre el

molde 3D y la PCB a colocar. Los sensores de proximidad disponibles en el mercado incluyen opciones inductivas, capacitivas, ópticas, magnéticas y ultrasónicas.

Considerando que las PCBs presentan distintos diseños, no se puede garantizar la presencia de un material metálico o plástico en un punto específico, por lo que se descarta el uso del sensor inductivo. En relación con el uso de un sensor óptico, estos podrían afectar el entorno debido a la luz no deseada, por lo que no se utilizarán. Por otro lado, un sensor magnético opera mediante la atracción entre el imán y el objeto objetivo para detectar su presencia. Sin embargo, dado que no se puede garantizar la existencia de materiales que ejerzan magnetismo, se descarta el uso de este tipo de sensores.

Se plantea el uso de un sensor de proximidad ultrasónico o capacitivo. El sensor ultrasónico ofrece una rápida velocidad de detección, incluso para objetos pequeños, y tiene un amplio rango de detección. Además, puede identificar objetivos independientemente del material, sean sólidos o líquidos. Por otro lado, los sensores capacitivos pueden detectar tanto materiales metálicos como no metálicos, y presentan distintos rangos de detección y velocidades [49].

A partir de la búsqueda de información interna y externa, así como del criterio personal y el apoyo del personal de ingeniería de la empresa Gener8, los sensores seleccionados son: XXW54P3APL01M12 de Telemecanique, FW-H07 de Keyence, CQF16-06EPSEP1 de Sick y CQ28-10NPP-KU1 de SICK [50][51][52][53][54].

Se definieron los siguientes criterios de selección:

- Rango de funcionamiento del sensor: corresponde a los valores máximo y mínimo que puede medir el sensor.
- Dimensiones: tamaño del sensor.
- Velocidad de respuesta del sensor: capacidad del sensor para que la señal de salida siga las variaciones de la señal de entrada sin retrasos
- Precio: costo del sensor.

Se realizó el proceso de filtrado de conceptos. Cada uno se evaluó según la aplicación requerida y la información técnica recopilada para cada elemento. Para ello, se utilizó una tabla con los criterios de selección establecidos, eligiendo uno de los conceptos como referencia y asignándole un valor de cero (0) en todos los criterios. A los demás conceptos se les asignó un cero (0), un más (+) o un menos (-) en cada criterio, según su adecuación al proyecto en comparación con la referencia. Tras sumar los valores positivos, ceros y negativos de cada concepto, se clasificaron en tres categorías: no continúan, se revisan o continúan.

En la tabla 3.13, se presenta el filtrado de los conceptos, tomando como referencia el sensor E53KAL30T110E de Eaton. Como resultado, se eliminaron el sensor XXW54P3APL01M12 de Telemecanique y el sensor E53KAL30T110E de Eaton, ya que fueron insuficientes en aspectos de velocidad, dimensiones y precio. Con mayor puntuación se encuentra el sensor ultrasónico FW-H02 de Keyence, mientras que en igualdad de puntaje están los sensores capacitivos de la marca Sick.

**Tabla 3.13:** Filtrado de conceptos para sensor de posición de PCB.

Criterios de selección	Conceptos				
	XXW54P3APL01M12 Telemecanique Ultrasonic	FW-H02 Keyence	E53KAL30T110E Eaton (Referencia)	CM30-25NNP-EC1 SICK	CQ28-10NPP-KU1 SICK
Velocidad de respuesta	-	-	0	-	-
Dimensiones	+	+	0	+	+
Rango de funcionamiento	+	+	0	0	0
Precio	-	+	0	+	+
Suma +	2	3	0	2	2
Suma 0	0	0	0	0	1
Suma -	2	1	0	1	1
<b>Evaluación Neta</b>	0	2	0	1	1
<b>Lugar</b>	3	1	3	2	2
<b>Continua</b>	No	Si	No	Si	Si

Posterior al filtrado de conceptos, se llevó a cabo la evaluación de aquellos que continuaron en el proceso. Para ello, se asignó un peso a cada criterio, basado en la información recopilada sobre los sensores y su aplicación en el proyecto. Se utilizó una tabla para listar los criterios de selección, y a cada concepto se le asignó una puntuación del 1 al 5 en cada criterio, donde 1 representa la menor puntuación y 5 la mayor. Esta calificación se realizó a partir de una búsqueda de información, criterios propios y consultas con los ingenieros de la empresa. La puntuación final se calculó promediando el puntaje con el peso asignado a cada criterio.

Se otorgó mayor peso al rango de funcionamiento y a las dimensiones. El sensor debe captar la posición de la tarjeta a una distancia aproximada de 5 mm a 15 mm y permitir su colocación entre la tarjeta y la plataforma diseñada, por lo que debe ser compacto. En la tabla 3.14 se presenta la evaluación realizada de los conceptos, resultando como opción principal el sensor CQ28-10NPP-KU1 de SICK. Este sensor tiene un rango de funcionamiento de 1 mm a 10 mm, dimensiones de 28 mm x 46 mm x 5.5 mm, salida PNP y función normalmente cerrada (NC) o normalmente abierta (NO) [53].

**Tabla 3.14:** Evaluación de conceptos para el sensor de posición de la PCB.

Criterios de selección	Peso (%)	Conceptos					
		FW-H07 Keyence		CM30-25NNP-EC1 SICK		CQ28-10NPP-KU1 SICK	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Rango de funcionamiento	30	3	0,9	4	1,2	5	1,5
Dimensiones	30	3	0,9	3	0,9	5	1,5
Velocidad de respuesta	25	2	0,5	5	1,25	4	1
Precio	15	3	0,45	5	0,75	4	0,6
<b>Total de puntos</b>	100		2,75		4,1		4,6
<b>Lugar</b>		3		2		1	
<b>Continua</b>		No		No		Si	

## Interruptor para cierre de puerta

Para verificar el cierre de la estructura y, por ende, el aislamiento de la PCB, se propone el uso de interruptores de no contacto. Estos dispositivos son económicos, fáciles de instalar y ofrecen alta precisión [55]. Se evaluaron tres fabricantes según los siguientes criterios de selección:

- Configuración eléctrica: se busca posea una conexión PNP o NPN y salida tipo cable.
- Tiempo de respuesta: tiempo transcurrido desde que se presenta una señal de entrada hasta que se genera una respuesta.
- Rango de funcionamiento del sensor: corresponde a los valores máximo y mínimo que el sensor puede medir.
- Precio: costo del sensor

Posterior a la búsqueda interna y externa de información, así como al criterio de expertos y al criterio personal, se definieron los siguientes candidatos a solución: D40A-1C2 de Omron, GS-13P5 de Keyence y SI-RFPT-U2M de Banner. Se realizó el proceso de filtrado de conceptos. Cada uno de los conceptos se evaluó según la aplicación requerida y la información técnica recopilada. Para ello, se utilizó una tabla con los criterios de selección establecidos, eligiendo uno de los conceptos como referencia y asignándole un valor de cero (0) en todos los criterios. A los demás conceptos se les asignó un cero (0), un más (+) o un menos (-) en cada criterio, según su adecuación al proyecto en comparación con la referencia. Tras sumar los valores positivos, ceros y negativos de cada concepto, se clasificaron en tres categorías: no continúan, se revisan o continúan.

En la tabla 3.15, se presenta el filtrado de los conceptos, donde se observa que los interruptores D40A-1C2 de Omron y GS-13P5 de Keyence poseen un tiempo de respuesta y un rango de funcionamiento apropiados para la aplicación, en comparación con los otros conceptos.

**Tabla 3.15:** Filtrado de conceptos para interruptor de cierre de puerta.

Criterios de selección	Conceptos		
	D40A-1C2 Omron	GS-13P5 keyence (Referencia)	SI-RFPT-U2M Banner
Configuración eléctrica	0	0	0
Tiempo de respuesta	-	0	-
Rango de funcionamiento	0	0	-
Precio	+	0	+
Suma +	1	0	1
Suma 0	0	0	0
Suma -	1	0	2
<b>Evaluación Neta</b>	0	0	-1
<b>Lugar</b>	1	1	2
<b>Continua</b>	Si	Si	No

Posterior al filtrado de conceptos, se realizó la evaluación de aquellos que continuaron en el proceso. Para ello, se asignó un peso a cada criterio, basado en la información recopilada

sobre los interruptores y su aplicación en el proyecto. Se utilizó una tabla para listar los criterios de selección, y a cada concepto se le asignó una puntuación del 1 al 5 en cada criterio, donde 1 representa la menor puntuación y 5 la mayor. Esta calificación se realizó a partir de una búsqueda de información, criterios propios y consultas con los ingenieros de la empresa. La puntuación final se calculó promediando el puntaje con el peso asignado a cada criterio.

A partir de la evaluación de conceptos, como se aprecia en la tabla 3.16, el interruptor D40A-1C2 de Omron presentó las mejores características, destacando especialmente el precio del equipo. Este dispositivo cuenta con configuración normalmente abierto (NO), salida PNP, distancia de activación de 5 mm y un peso total de 160 g entre el actuador y el interruptor.

**Tabla 3.16:** Evaluación de conceptos para sensor de cierre de puerta.

Criterios de selección	Peso (%)	Conceptos			
		D40A-1C2 Omron		GS-13P5 keyence	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Configuración eléctrica	25	5	1,25	5	1,25
Tiempo de respuesta	20	4	0,8	5	1
Rango de funcionamiento	25	5	1,25	5	1,25
Precio	30	5	1,5	2	0,6
<b>Total de puntos</b>	100		4,8		4,1
<b>Lugar</b>		1		2	
<b>Continúa</b>		Si		No	

### 3.4.6. Resumen de selección de conceptos

Después del proceso de selección de conceptos, se lograron determinar con éxito las soluciones para las subfunciones de iluminación, estructura de montaje, cámara, óptica y sensores. A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes de cada concepto seleccionado, que contribuyen a la solución final del problema.

- La iluminación seleccionada para garantizar la correcta visualización de los componentes en la PCB es un anillo de luz difusa de múltiples ángulos.
- Con el objetivo de aislar la PCB en inspección del entorno, la estructura de montaje y captura de imágenes está compuesta por los siguientes elementos:
  - Estructura metálica rectangular.
  - Dos puertas de apertura lateral.
  - Manija para gaveta.
  - Soporte de cámara: tornillos fijados directamente a la cámara, conectados a una placa colocada a 0°.
  - Sujeción de las tarjetas: lámina con agujeros junto con soporte impreso en 3D.

- Para la captura de imágenes, se seleccionó la cámara Cognex Insight 3808M, que cumple con los requisitos de resolución, tipo de sensor, montura y características necesarias para la inspección de PCBs. Además, la óptica elegida es compatible con la cámara y satisface la distancia focal requerida de 12 mm.
- Mediante el sensor de proximidad capacitivo CQ28-10NPP-KU1 de SICK, se monitoreará la colocación correcta de la PCB en la zona de inspección
- Se seleccionaron los interruptores de no contacto D40A-1C2 de Omron para monitorear cada una de las puertas de la estructura, con el fin de verificar que no ingrese luz externa a su interior.

A partir de los elementos seleccionados, se podrá realizar el diseño del sistema para la detección de anomalías en las PCBs.



# Capítulo 4

## Solución propuesta

En este capítulo se describen las etapas que conforman el diseño del sistema destinado a la detección automática de anomalías en las PCBs de la empresa. Estas etapas incluyen el diseño estructural del sistema, el diseño eléctrico y el desarrollo del software.

En la sección de diseño estructural, se especifican los materiales, las dimensiones de los elementos y todas las consideraciones necesarias para el montaje del sistema. La sección dedicada al diseño eléctrico detalla la conexión de todos los componentes que integran el sistema propuesto. Por último, en el apartado del diseño del software, se presentan las técnicas seleccionadas para la detección de anomalías y su desarrollo.

### 4.1. Diseño estructural del sistema

En esta sección se definen las características, normas y cálculos realizados para el diseño estructural del sistema. Se presenta lo correspondiente al aislamiento del sistema, la sujeción de los elementos para la captura de la imagen, el soporte de los sensores y el posicionamiento de la muestra en estudio.

#### 4.1.1. Estructura de aislamiento

Como requisito del sistema de visión propuesto, es esencial contar con una estructura que aisle las PCBs en estudio de posibles fuentes de luz, sombras o partículas que puedan comprometer la integridad de la imagen a capturar. Para ello, se diseñó una estructura rectangular de metal, equipada con dos puertas de apertura lateral y manijas para facilitar su uso.

Se estableció como criterio de diseño no exceder un volumen de  $0.096 m^3$ . Las dimensiones de ancho, largo y altura del sistema se determinaron considerando el tamaño de la PCB en estudio (305 mm x 215 mm) y la distancia de trabajo requerida para la captura de la imagen (477.3 mm). Para la construcción, se utilizó un perfil estructural Bosh de 30x30 mm, fabricado en aluminio 6063 anodizado. Este perfil Bosh, desarrollado por la empresa alemana Bosch, es un sistema modular de perfiles de aluminio extruido, reconocido por su flexibilidad,

resistencia y facilidad de ensamblaje [56]. Se empleó un perfil 6, y en la figura 4.1 se presenta un corte del mismo.



**Figura 4.1:** Perfil estructural utilizado. Elaboración propia.

El aluminio 6063 es una aleación que destaca por su rendimiento en aplicaciones estructurales ligeras. Su resistencia a la corrosión lo convierte en una opción ideal para entornos con alta humedad. Además, este metal presenta una superficie lisa que acepta bien el anodizado, un proceso que no solo incrementa su resistencia a la corrosión, sino que también ofrece diversas posibilidades estéticas [57].

En resumen, el aluminio 6063 presenta las siguientes características [57]:

- Alta resistencia a la corrosión.
- Resistencia mecánica media.
- Buena conformabilidad.
- Buena maquinabilidad.
- Aceptación del proceso de anodizado.

Como elemento fundamental en la captura de imágenes, se determinó el acabado superficial de los perfiles. Se optó por un acabado negro mate en las estructuras, evitando brillos que pudieran afectar la calidad de la imagen. Los perfiles, de longitudes definidas, se unieron mediante tornillería específica para estructuras modulares. La tornillería utilizada consistió en un tornillo central autorroscante de acero para el perfil 6. Se emplearon tapetas plásticas negras en los bordes con el fin de prevenir accidentes durante la manipulación y proporcionar un acabado final estético al producto.

En cuanto a las paredes y los techos de la estructura, se utilizaron paneles que tienen diversas aplicaciones en el mercado, como revestimientos, protecciones, superficies de trabajo y estantes. Estos paneles están disponibles en una amplia variedad de materiales, con diferentes propiedades y colores. Se pueden incorporar en un marco de perfil o unir a perfiles [58]. Para la estructura diseñada, se seleccionaron paneles plásticos de polietileno en color negro mate. Esta elección permitió reducir costos, mantener una estructura ligera, evitar reflejos y proteger el interior de las condiciones externas.

Los paneles se unieron a los perfiles mediante multibloques adhesivos. Este tipo de unión permite fijar los paneles a ras en los marcos de perfiles de manera rápida y sin necesidad de mecanizado. Además, esta tecnología de adhesión se puede utilizar para crear paneles de doble cara sin que se vean tornillos. Para maximizar la estabilidad del panel, es recomendable colocar un multibloque adhesivo lo más cerca posible de cada esquina. El espacio máximo entre dos multibloques no debe exceder los 300 mm [59].

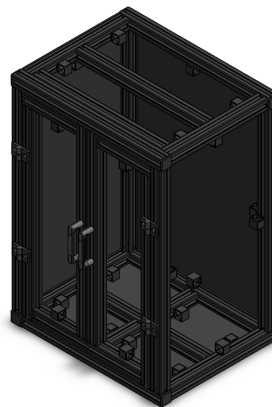
Para la zona de ingreso de las tarjetas, se emplearon dos puertas de apertura lateral. Los marcos se crearon con perfiles estructurales unidos mediante tornillería, y se utilizaron paneles plásticos colocados en los marcos con multibloques. La apertura se realizó mediante manijas con dos puntos de fijación. Las manijas seleccionadas permiten un agarre total con la mano y se pueden usar fácilmente a diferentes alturas. Están fabricadas en poliamida reforzada con fibra de vidrio, lo que les proporciona un agarre muy ergonómico [60]. Se utilizó una manija en cada puerta, fijándolas al perfil con tornillería.

La unión de cada puerta al resto de la estructura de aislamiento se realizó mediante bisagras que permiten una apertura de  $90^\circ$  en cada puerta. Estas bisagras se fijaron a los perfiles utilizando tornillería.

En la figura 4.2 se presenta la estructura de aislamiento desde la vista exterior, donde se pueden apreciar los perfiles estructurales, los paneles, las bisagras y las manijas. Por otro lado, en la figura 4.3 se muestra el interior de la estructura, destacando los perfiles estructurales, los paneles plásticos y los multibloques previamente descritos. Los multibloques fueron posicionados respetando la distancia máxima establecida entre ellos.



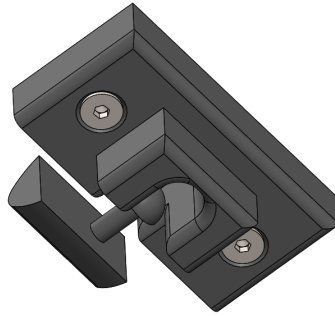
**Figura 4.2:** Estructura de aislamiento del sistema. Vista Externa. Elaboración propia.



**Figura 4.3:** Estructura de aislamiento del sistema. Vista Interna. Elaboración propia.

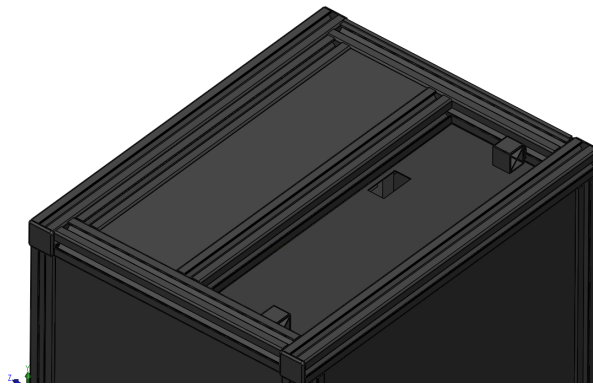
Para asegurar el cierre de la puerta, se instalaron cierres de acción rápida. Este sistema consta de dos partes: un retenedor de bola, que se fijó en el perfil receptor, y un tornillo

con cabeza tipo bola, que se colocó en el perfil de la puerta. Este mecanismo se ilustra en la figura 4.4 y puede adquirirse en la industria de perfiles modulares.

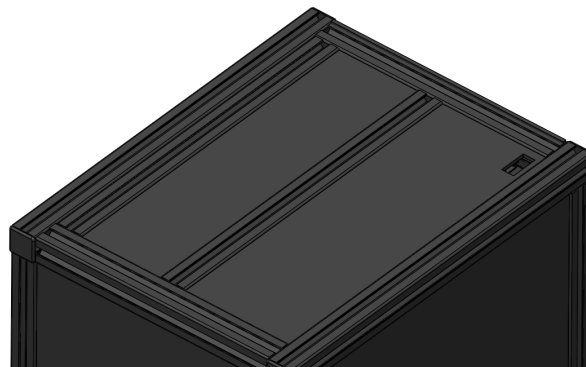


**Figura 4.4:** Sistema de cierre de puertas. Elaboración propia.

Dado que se trata de una estructura que aísla el interior de la entrada de luz, es esencial garantizar la salida del cableado sin comprometer su funcionalidad. Para ello, se optó por paneles de doble cara en la parte superior. Estos paneles cuentan con aperturas en zonas opuestas, lo que permitió el paso del cableado sin afectar la iluminación dentro de la estructura. En la figura 4.5 se muestra la cara inferior con el primer agujero, mientras que en la figura 4.6 se presenta la cara superior con el agujero de salida.



**Figura 4.5:** Apertura para cableado. Vista cara interna. Elaboración propia.



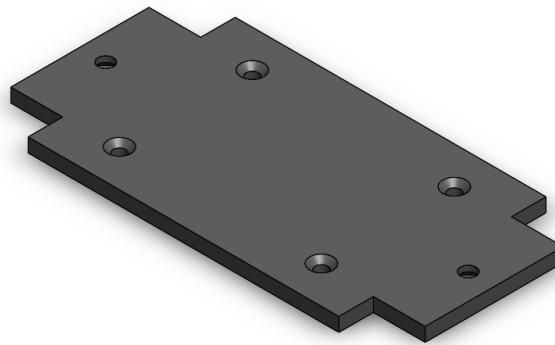
**Figura 4.6:** Apertura para cableado. Vista cara externa. Elaboración propia.

### 4.1.2. Sujeción de la cámara

Para lograr la captura de la imagen, se colocó la cámara en la parte superior y central de la estructura. Esta ubicación permitió visualizar un campo de visión de 305 mm x 215 mm y mantener la cámara fija en todo momento, ya que los cambios de posición en la imagen capturada podían afectar los resultados del análisis.

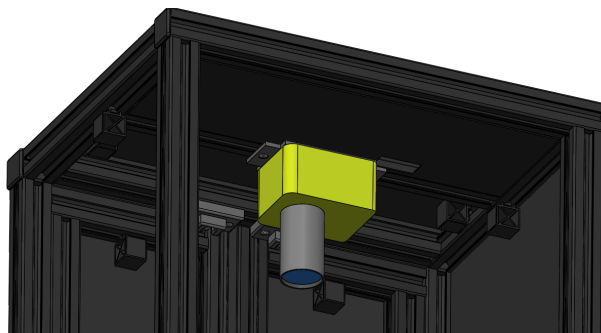
La altura de la estructura de aislamiento permitió colocar un soporte para la cámara con un grosor de 4 mm, manteniendo la distancia de trabajo necesaria de 477.3 mm. Las dimensiones de ancho y largo del soporte se definieron considerando el tamaño y las zonas de sujeción de la cámara Insight 3808. Se estableció la ubicación de la zona de sujeción a la cámara cercana al ancho de la cámara, mientras que la zona de sujeción a la estructura se diseñó con un ancho adecuado a la viga de soporte. Se crearon cuatro agujeros M3 para atornillar la cámara y dos agujeros M4 para fijar el soporte a la estructura.

El material del soporte es aluminio 6061, ampliamente utilizado por su mayor resistencia en comparación con otras aleaciones de la serie 6xxx. Esta aleación es una de las más populares y resulta adecuada para casi cualquier aplicación que requiera un metal ligero pero resistente. Las estructuras fabricadas con este material, como tubos, chapas, barras y placas, ofrecen una resistencia de alta a moderada, así como una excelente resistencia a la corrosión, buena maquinabilidad y soldabilidad [61]. En la figura 4.7, se observa el soporte diseñado para la cámara.



**Figura 4.7:** Soporte de la cámara. Elaboración propia.

En la figura 4.8, se muestra el soporte de la cámara instalado en la viga superior de la estructura de aislamiento. Este soporte aseguró la sujeción de la cámara en la posición correcta para la captura de la imagen.

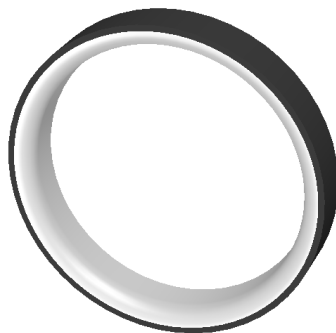


**Figura 4.8:** Colocación del soporte de la cámara. Elaboración propia.

### 4.1.3. Soporte para la iluminación

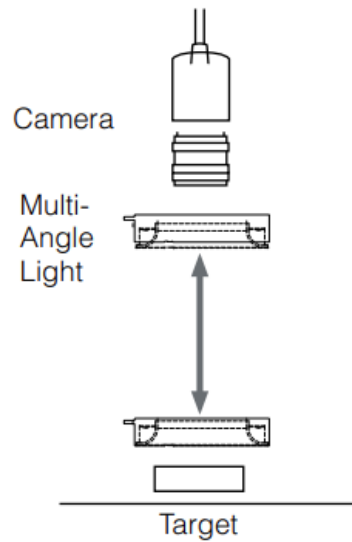
La iluminación es un aspecto fundamental para garantizar la calidad de la imagen. Se eligió un anillo de luz difusa, teniendo en cuenta que las dimensiones de la estructura permiten una iluminación con un diámetro externo de hasta 280 mm.

Se utilizó un anillo de luz difusa blanca, con un diámetro interno de 153 mm, un diámetro externo de 180 mm y una potencia de 11.6 W. Esta iluminación cuenta con un conector tipo M12 y agujeros en la parte posterior para su fijación a un soporte. En la figura 4.9, se ejemplifica la iluminación seleccionada, la cual puede adquirirse a través de distintos proveedores, como Moritex y Keyence.



**Figura 4.9:** Iluminación tipo anillo de luz difusa. Elaboración propia.

En este tipo de iluminación, la cámara se coloca en el centro del anillo, y la altura a la que se ubica el anillo varía según la aplicación. En la figura 4.10, se observa una posible disposición de los elementos. Cuando la distancia entre la luz y el objetivo es amplia, la luz difusa y multiangular ilumina todo el objetivo de manera uniforme, creando un efecto similar al de una iluminación tipo domo. Por otro lado, cuando la distancia es corta, la luz emitida en un ángulo poco pronunciado se refleja directamente en la cámara, lo que resalta los bordes del objetivo y genera un efecto parecido al que se obtiene con una fuente de luz de ángulo bajo [14].



**Figura 4.10:** Opciones de ubicación para la iluminación tipo anillo de luz difusa [14].

Para la inspección de los distintos componentes en la PCB, se planteó el uso de iluminación tipo anillo de luz difusa, ubicándola a una distancia amplia entre la cámara y el objetivo. Se colocó la iluminación a la misma altura que la cámara, lo que, como se mencionó, proporciona una luz uniforme en toda la PCB, permitiendo la aplicación de diversas técnicas de inspección en la imagen. Dado que la inspección requiere más de una técnica y no se centra únicamente en el análisis de los bordes, se descartó la ubicación a corta distancia.

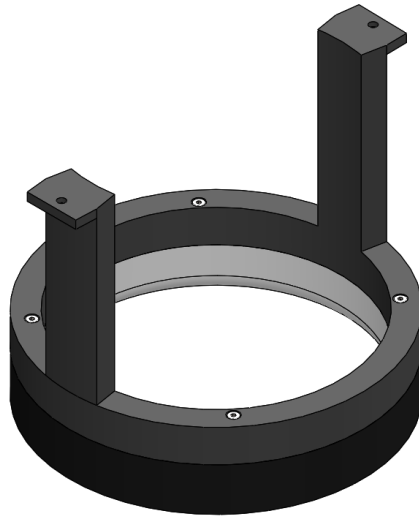
El soporte diseñado consistió en un anillo con las dimensiones de la iluminación y cuatro agujeros que coinciden con los ubicados en la parte posterior del dispositivo. Se crearon cuatro agujeros M3 para fijar el soporte a la luz y dos agujeros M4 para atornillar el soporte a la estructura. El material utilizado es aluminio 6061 anodizado en negro, ya que se busca evitar cualquier superficie que genere reflexión en el interior de la estructura. En la figura 4.11, se muestra el soporte de iluminación descrito



**Figura 4.11:** Soporte de iluminación diseñado. Elaboración propia.

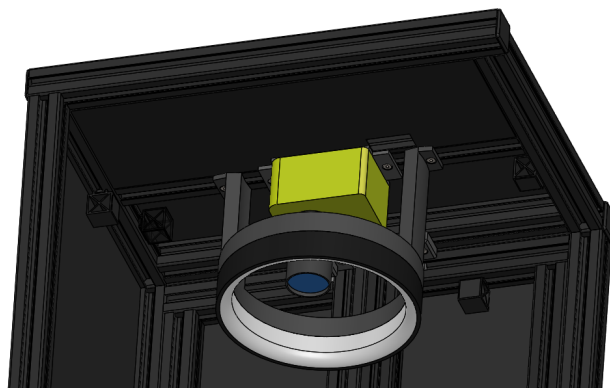
En la figura 4.12, se presenta el soporte diseñado, atornillado a la iluminación tipo anillo

de luz difusa. Se observa que la sujeción se realizó mediante cuatro tornillos dispuestos con separaciones de  $90^\circ$  a lo largo de los  $360^\circ$  del anillo. Esta distribución proporcionó una unión estable entre las partes, evitando movimientos de la iluminación que podrían afectar la captura final de la imagen.



**Figura 4.12:** Soporte de iluminación diseñado, instalado en la iluminación seleccionada. Elaboración propia.

Tras la instalación de la iluminación en el soporte, se atornilló este último a la viga estructural. Los segmentos sobresalientes del soporte se unieron a la viga, proporcionando la profundidad necesaria para situar la iluminación a la altura de la óptica. Esto elimina las sombras en la imagen generadas por la cámara y la óptica. En la figura 4.13, se muestra la ubicación de la iluminación en la estructura de aislamiento.

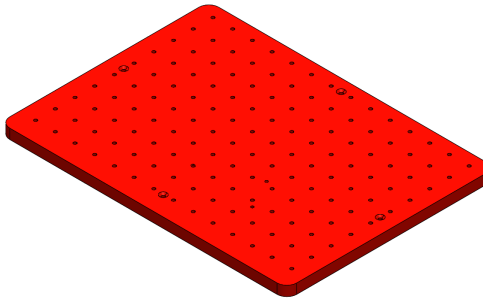


**Figura 4.13:** Soporte de iluminación integrado en la estructura de aislamiento. Elaboración propia.

#### 4.1.4. Sujeción de la PCB

Para el diseño de la sujeción de la PCB al sistema, se diseñó una placa de aluminio 6061 anodizado con dimensiones de 369.82 mm x 269.24 mm. La placa fue perforada con agujeros para tornillos M3, formando una matriz de 14 columnas y 10 filas. Esta disposición permite escalar el diseño al ubicar diferentes bases de tarjetas mediante un sistema alfanumérico.

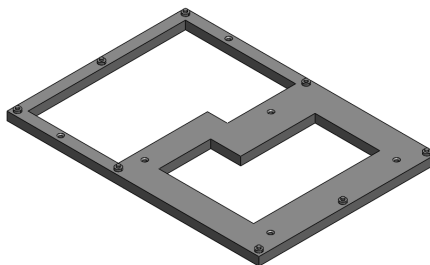
La placa se sujetó a la parte inferior de la estructura de aislamiento mediante cuatro tornillos M4. Además, se perforaron dos agujeros para instalar el sensor de posición de la tarjeta. En la figura 4.14 se muestra el diseño de la placa perforada.



**Figura 4.14:** Placa diseñada para la ubicación del soporte de PCBs de la empresa. Elaboración propia.

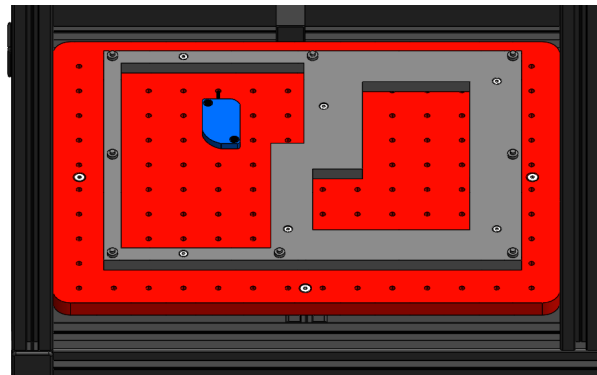
La base para la tarjeta en estudio se diseñó en material antiestático ABS mediante impresión 3D. Este material cumple con la norma IPC-1601, garantizando que el contacto de la tarjeta con la base no afecta la integridad de la PCB. La estructura de la base mantiene la PCB a una distancia de 10.16 mm de la placa de soporte, lo que permitió la colocación del sensor de posición de la tarjeta.

La base cuenta con seis agujeros para atornillarla a la placa, distribuidos de manera que proporcionan mayor estabilidad a la unión entre las partes. Además, presenta ocho puntos sobresalientes que coinciden con los agujeros en la PCB, lo que asegura la ubicación exacta de la tarjeta sobre la base. Este sistema previene movimientos en la imagen capturada, beneficiando el procesamiento posterior. En la figura 4.15 se muestra el diseño de la base para la PCB 98 L.



**Figura 4.15:** Base diseñada para la sujeción de la PCB 98 L. Elaboración propia.

En la figura 4.16 se observa la placa con la base atornillada, así como el sensor de posición en su ubicación correspondiente. El cable del sensor se dirigió a través del agujero más cercano, saliendo hacia el panel posterior, de manera que no interfirió con la colocación de la base.

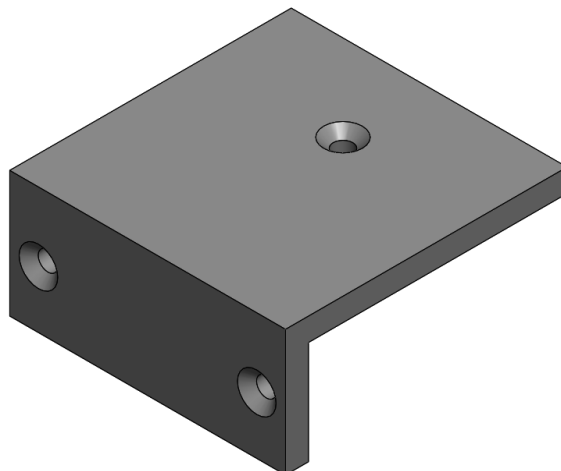


**Figura 4.16:** Diseño completo de la sujeción de la tarjeta. Elaboración propia.

#### 4.1.5. Soporte del interruptor de cierre de puerta

Un interruptor de no contacto consta de dos partes: un actuador y un interruptor. Estos dispositivos deben instalarse en la estructura que se desea monitorear para su apertura y cierre. En la puerta de la estructura de aislamiento, se colocó el actuador en una de las vigas horizontales superiores mediante tornillería. El interruptor se ubicó en una de las vigas horizontales superiores de la estructura, de manera que permitió el alineamiento con el actuador al cerrar la puerta.

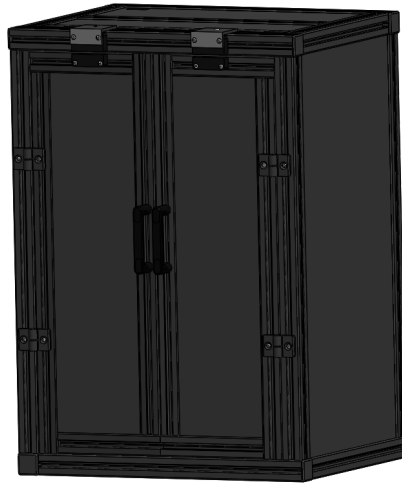
Dado que no fue posible atornillar el interruptor a la viga debido a sus dimensiones, se diseñó un soporte en aluminio 6061 en forma de L, que proporcionó sujeción tanto a la viga como al interruptor mediante tornillería. En la figura 4.17 se muestra el diseño realizado para el soporte del interruptor.



**Figura 4.17:** Soporte para el interruptor de cierre de puerta. Elaboración propia.

#### 4.1.6. Ensamblaje de la estructura para la captura de imágenes

A partir del diseño de la estructura de aislamiento, así como de los soportes para la iluminación, la cámara, el interruptor y la tarjeta, se construyó el sistema de montaje para la captura de imágenes. En la figura 4.18 se aprecia el sistema desde la vista externa, con todos los acabados completos. Se incluyen bisagras, manijas, tornillería, paneles e interruptores de puerta.



**Figura 4.18:** Vista exterior del sistema de montaje y captura de imágenes. Elaboración propia.

En la figura 4.19 se aprecia la disposición interna de los elementos. El sistema permitió mantener la distancia de trabajo y las condiciones de iluminación definidas. Además, el diseño facilitó la colocación del objetivo de captura en una posición fija. La estructura verde en la figura 4.19 ilustra la PCB 98 L en su posición de inspección.



**Figura 4.19:** Vista interior del sistema de montaje y captura de imágenes. Elaboración propia.

## 4.2. Diseño eléctrico

En esta sección se detallan las decisiones, protocolos y componentes utilizados para realizar el diseño eléctrico del sistema. Se presenta lo correspondiente a la conexión de la cámara, la conexión de los sensores y la conexión de la iluminación.

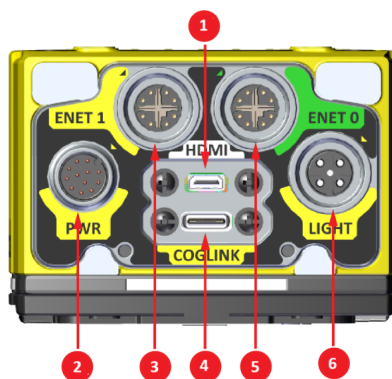
### 4.2.1. Conexión de la cámara

La cámara seleccionada para la implementación de la inspección proporciona una potente, pero fácil solución para inspecciones automatizadas. Entre las ventajas de este dispositivo se encuentran realizar más inspecciones en menos tiempo, mejorar la precisión de los resultados y escalar soluciones [20].

Para el uso y configuración de este dispositivo se requiere su conexión a una PC o HMI con acceso al sistema operativo Windows. Considerando la aplicación, el costo de los equipos y su accesibilidad por parte de la empresa, se optó por el uso de una computadora portátil. Se descargó el programa de manejo de la cámara en la PC. Para el modelo de cámara seleccionado se utilizó el software Cognex In-Sight Vision Suite 24.2.1. Esta versión incluye mejoras en el programa de entrenamiento denominado EasyBuilder, permite la adquisición de imágenes según una señal de hardware y presenta mejoras en el uso del modo en línea en comparación con versiones anteriores [62].

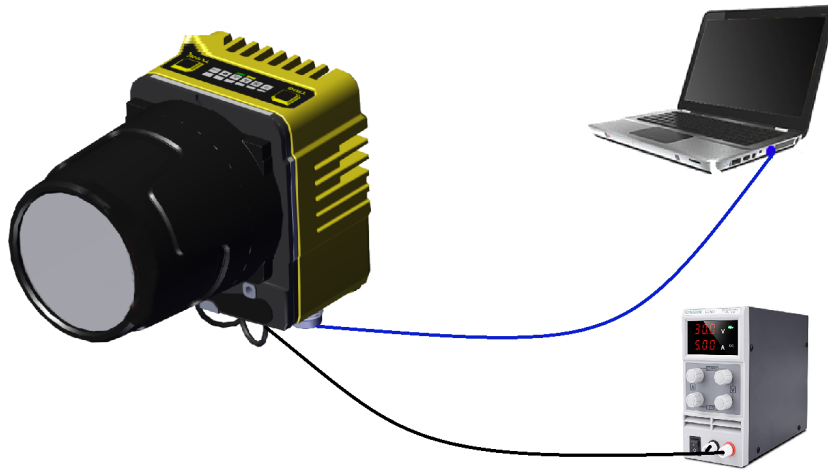
Una vez instalado el programa In-Sight Vision Suite, se realizó la conexión de la cámara a la PC. Se decidió utilizar el protocolo Ethernet, ya que proporciona una comunicación rápida, estable, segura y es adecuado para aplicaciones donde la PC se encuentra a distancias cercanas del dispositivo [63].

La cámara cuenta con distintos puertos, como se aprecia en la figura 4.20. La comunicación por Ethernet fue posible al conectar la cámara mediante un cable Ethernet a cualquiera de los dos puertos diseñados para este fin. La cámara se energizó a través de una fuente de 24V conectada al puerto de alimentación.



**Figura 4.20:** Puertos de conexión de la cámara: 1) Conector Micro-HDMI, 2) Conector del cable de alimentación de E/S, 3) Conector Ethernet 1, 4) Conector USB-C, 5) Conector Ethernet 0, 6) Conector de iluminación [15].

En la figura 4.21 se ilustra la cámara conectada a la PC por medio del protocolo de comunicación Ethernet y su conexión a la fuente de alimentación.



**Figura 4.21:** Conexión de la cámara. Elaboración Propia.

#### 4.2.2. Conexión de los sensores

Los sensores seleccionados permiten garantizar que la PCB en estudio fue correctamente colocada y que su iluminación no se afecta por luces externas. Cuando estas condiciones se cumplen, el sistema permite capturar la imagen.

Primeramente, para el control de los sensores se consideró el uso de un microcontrolador. Los sensores pueden ser conectados al microcontrolador, sin embargo, comunicar este con el software de la cámara es de alta complejidad. Al utilizar las cámaras de visión industrial se debe considerar que sus softwares son patentados y presentan técnicas complejas de análisis. Conectar la cámara a un microcontrolador que indique cuando capturar la imagen implica la compatibilidad de bibliotecas o bien la creación de estas. Por ello, este método de control de sensores y accionamiento de cámara no se implementó.

Otro dispositivo de control considerado fue un PLC, estos dispositivos de marcas como Allen-Bradley y Siemens pueden ser trabajados con las cámaras utilizadas en sistemas de visión industrial. Se consideró, según las fichas técnicas y la experiencia personal, el uso de un PLC Siemens modelo SIMATIC S7-1200 6ES7516-3AP03-0AB0. A partir del programa del PLC "Tia Portal" es posible leer los sensores, activar la cámara y poner en ejecución el análisis de la imagen captada. Al utilizar un PLC se prefiere diseñar una HMI para facilitar al operario el uso del sistema. Para poder implementar una HMI y utilizar el programa de análisis de imágenes solo se pueden utilizar tres modelos de HMI Siemens. Entre los modelos posibles se determinó como conveniente la HMI SIMATIC PC277G.

En la figura 4.22 se presenta el PLC y la HMI de la marca Siemens definidos como opción de control del sistema. Al considerar el precio de estos dispositivos al igual que la capacidad

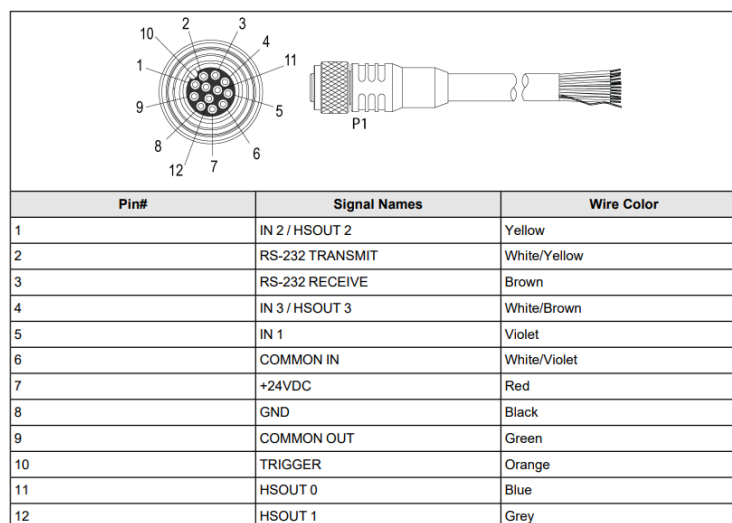
que abarca el proyecto; siendo una primera iteración con únicamente un sensor de posición y dos interruptores de puerta, se decidió buscar una alternativa más económica.



**Figura 4.22:** PLC y HMI compatibles con el sistema de visión propuesto [16] [17].

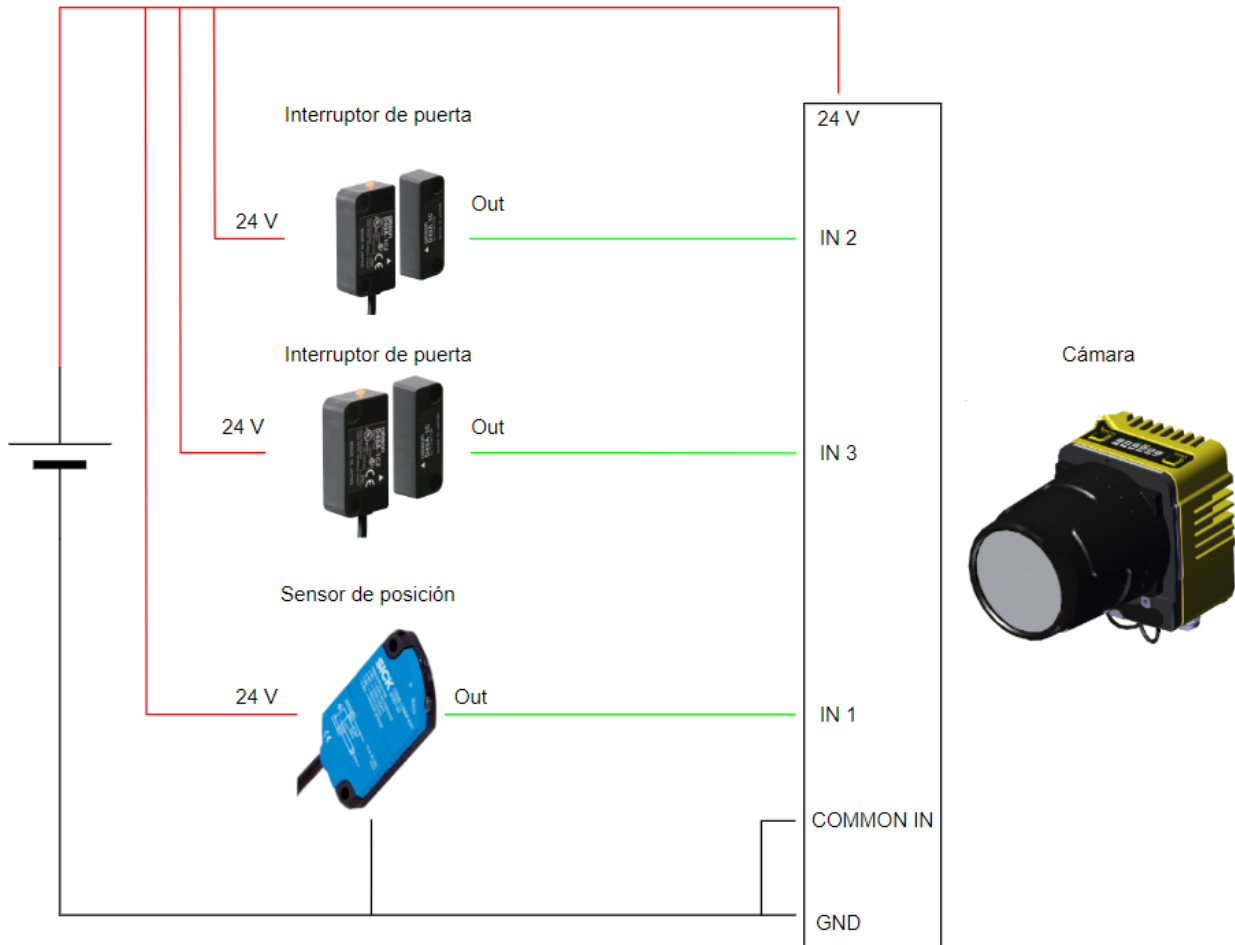
La alternativa de control encontrada corresponde a la posibilidad de conectar directamente los sensores a la cámara. En la figura 4.20 se presenta el puerto PWR (señalado con el número dos) con el cual no solo se energiza la cámara, sino que permite conectar algunas entradas y salidas. El cable de conexión proporciona conexiones a una fuente de alimentación externa, la entrada del disparador de adquisición, entradas de uso general, salidas de alta velocidad y comunicaciones RS-232 [15].

El diagrama de E/S se presenta en la figura 4.23. Se observa que se pueden conectar tres entradas, lo cual es exacto a lo requerido en este sistema. Esta alternativa elimina la cantidad de equipos requeridos y permite controlar la captura de la imagen. Por lo tanto, se utilizó este método para el control de los sensores y el accionamiento de la cámara en el sistema.



**Figura 4.23:** Diagrama de cable de conexión de E/S [15].

El sensor de posición CQ28-10NPP-KU1 de SICK y el interruptor de puerta D40A-1C2 de Omron son ambos de tipo PNP. Para su conexión, se utiliza el diagrama mostrado en la figura 4.24. En el diagrama se observa que se debió conectar la entrada común a tierra, conectar cada sensor a la tensión y a tierra, y su salida a la entrada digital de la cámara.



**Figura 4.24:** Diagrama de conexión eléctrica. Elaboración propia.

### 4.2.3. Conexión de la iluminación

El conector Light de la cámara seleccionada para el sistema de visión se utiliza para conectar un dispositivo de iluminación externo, proporcionando el control de la potencia y de la luz [15]. Este se aprecia en la figura 4.20 indicado con el número seis. La iluminación se conectó directamente a la cámara mediante el conector descrito. El tipo de conector es M12 e incluye conexiones para energía, tierra y control de la iluminación.

## 4.3. Diseño del Software

En esta sección se incluye lo relacionado a las técnicas, pasos y consideraciones para realizar el diseño del software del sistema. Se presenta lo correspondiente al diseño del software para la iniciación del sistema, el software para la detección de fallos por soldadura y el software para la detección de fallos por pines torcidos. Además, se muestra el diseño de la HMI para la aplicación.

### 4.3.1. Iniciación de sistema

Para iniciar el sistema, primero se configura el protocolo de comunicación en el programa In-Sight Vision Suite. Para ello, se seleccionó el protocolo de comunicación y la ruta de almacenamiento de las imágenes. Una vez realizada la configuración y conectado el cable Ethernet, es posible detectar la cámara y establecer la conexión.

La lógica de funcionamiento para los sensores y la captura de la imagen se aprecia en el diagrama de la figura 4.27. El botón de captura de imagen solo estará activo si los tres sensores del sistema están activos, de lo contrario el operario no podrá capturar la imagen y recibirá un mensaje indicando el error. Una vez que se verifica que los sensores están activos el operario podrá seleccionar el botón para capturar la imagen. Al capturar la imagen se realiza el análisis en busca de anomalías. Cuando el análisis fue realizado se muestra el resultado en la pantalla en el formato “Pasaindicando la tarjeta no tiene anomalías o “No Pasa.”<sup>en</sup> caso de detectar un defecto.

La programación se llevó a cabo en la hoja de cálculo del In-Sight Vision Suite. Esta hoja de cálculo permite, de manera amigable para el usuario, la programación de herramientas de inspección de imágenes, funciones de geometría, configuración de botones, configuración de entradas y salidas, así como la creación de textos y gráficos [35].

Se crearon las entradas para los sensores y el botón de captura de la imagen. Se asigna un uno a cada entrada al ser detectada, y en caso de que todas las entradas estén activas, se habilita el botón de captura de imagen. En la figura 4.25 se presenta el programa realizado, en el cual los sensores están inactivos y, por ende, el botón de captura está deshabilitado. En la figura 4.26 se muestra una simulación con los sensores activos y el botón de captura habilitado.

	A	B	
0	<input type="checkbox"/> Image		
1			
2	Inicio		
3	Verificación de los sensores	Mensajes al usuario	
4			
5	<input type="checkbox"/> Sensor_Posición		
6	Presente	0,000	Tarjeta en posición erronea
7	<input type="checkbox"/> Interruptor de Puerta 1		
8	Presencia	0,000	Revisar puerta
9	<input type="checkbox"/> Interruptor de Puerta 2		
10	Presencia	0,000	Revisar puerta
11	Sumatoria	0,000	
12	Verificado	0,000	
13	<input type="checkbox"/> Captura de Imagen		

**Figura 4.25:** Programación de los sensores en el programa In-Sight Vision Suite. Botón de captura inhabilitado. Elaboración propia.

	A	B	
0	<input type="checkbox"/> Image		
1			
2	Inicio		
3	Verificación de los sensores	Mensajes al usuario	
4			
5	<input checked="" type="checkbox"/> Sensor_Posición		
6	Presente	1,000	Tarjeta en posición
7	<input checked="" type="checkbox"/> Interruptor de Puerta 1		
8	Presencia	1,000	Puerta cerrada
9	<input checked="" type="checkbox"/> Interruptor de Puerta 2		
10	Presencia	1,000	Puerta cerrada
11	Sumatoria	3,000	
12	Verificado	1,000	
13	<input type="checkbox"/> Captura de Imagen		

**Figura 4.26:** Simulación de programación de los sensores en el programa In-Sight Vision Suite. Botón de captura habilitado. Elaboración propia.

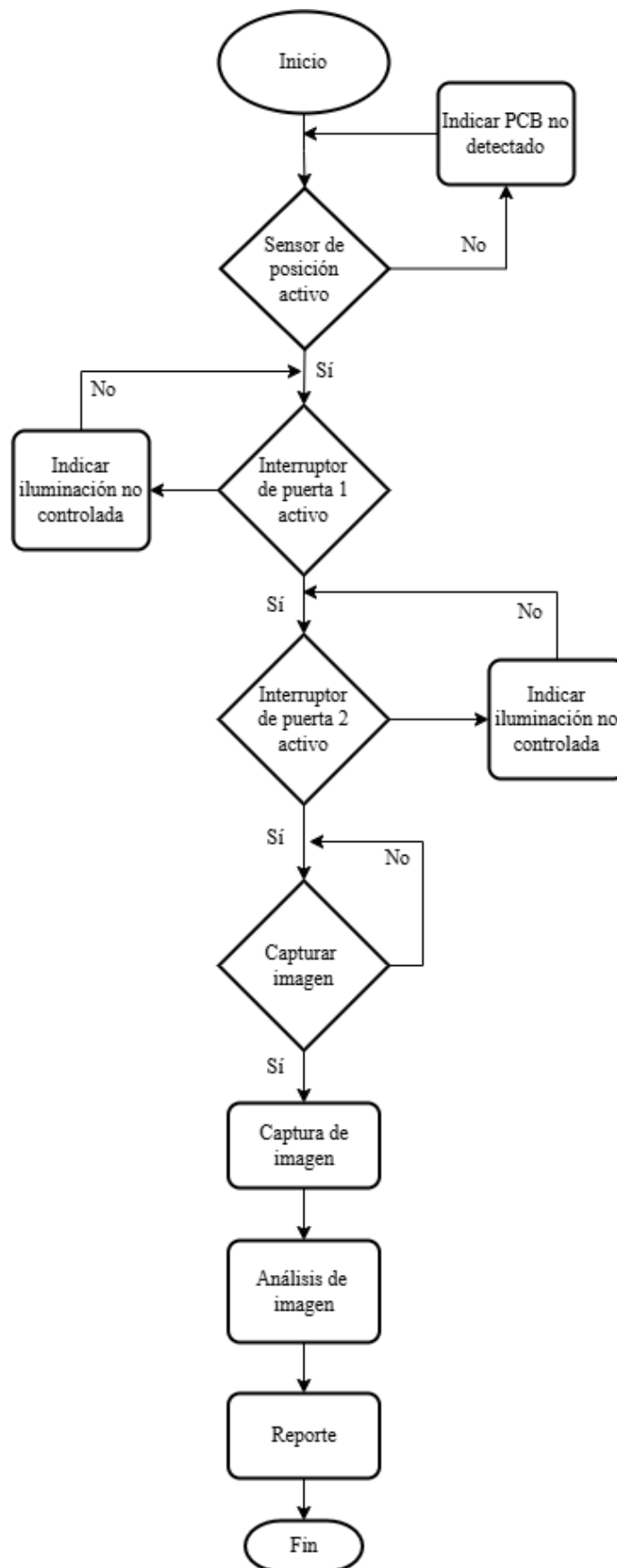
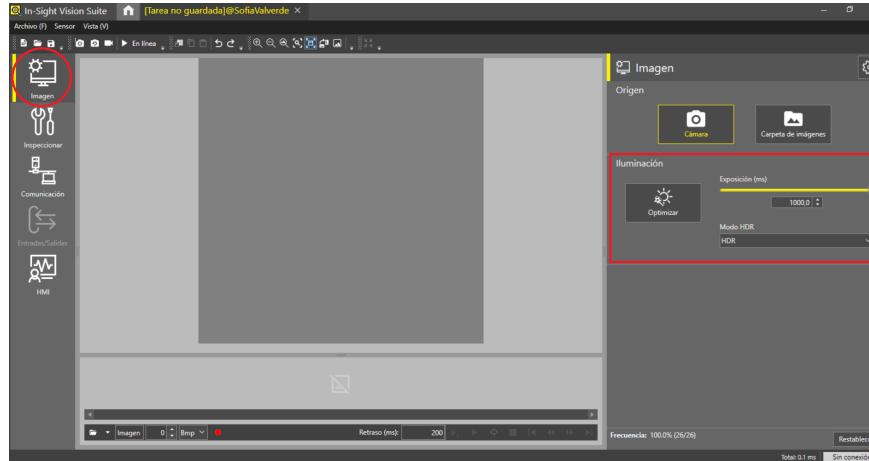


Figura 4.27: Diagrama de lógica del sistema. Elaboración propia.

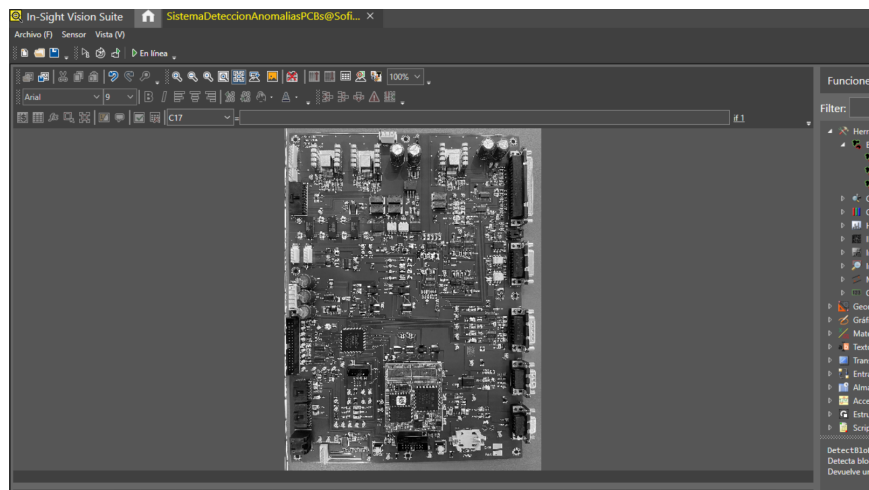
Con respecto a la iluminación, antes de utilizar el dispositivo de iluminación externo, se configura los ajustes de luz dentro de In-Sight Vision Suite. Para ello, se seleccionó el ícono indicado con el círculo rojo en la figura 4.28. La intensidad de la iluminación se configuró en la zona emergente señalada con el rectángulo rojo de la figura.



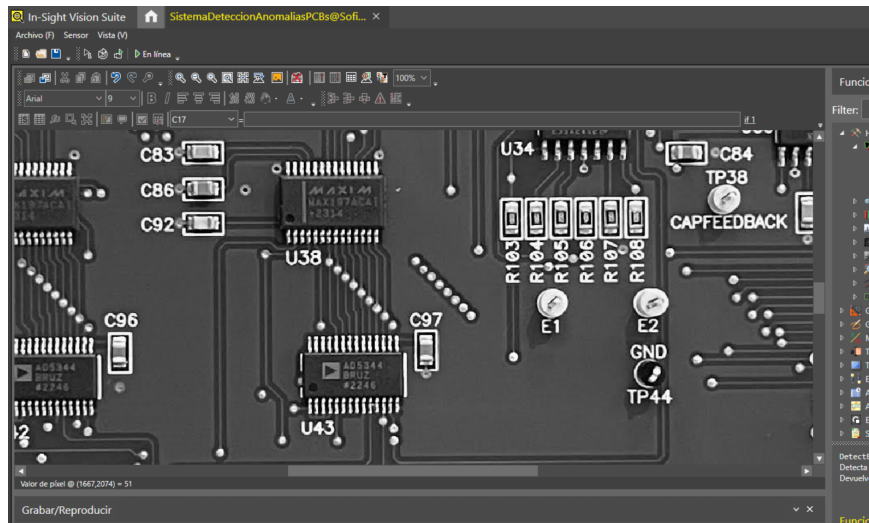
**Figura 4.28:** Configuración de la iluminación en el software In-Sight Vision Suite. Elaboración propia.

### 4.3.2. Detección de fallos por soldadura

La cámara Insight 3808 es capaz de captar la PCB 98 L completa como se aprecia en la figura 4.29 y por medio de la aplicación de acercamientos realizar el entrenamiento a cada componente sin perder el detalle de los elementos (figura 4.30). Se aclara que la imagen fue capturada con un celular de 8 Mp y convertida a formato de apertura por el programa, lo cual permitió ilustrar algunas funciones, pero no la aplicación de todas las herramientas.



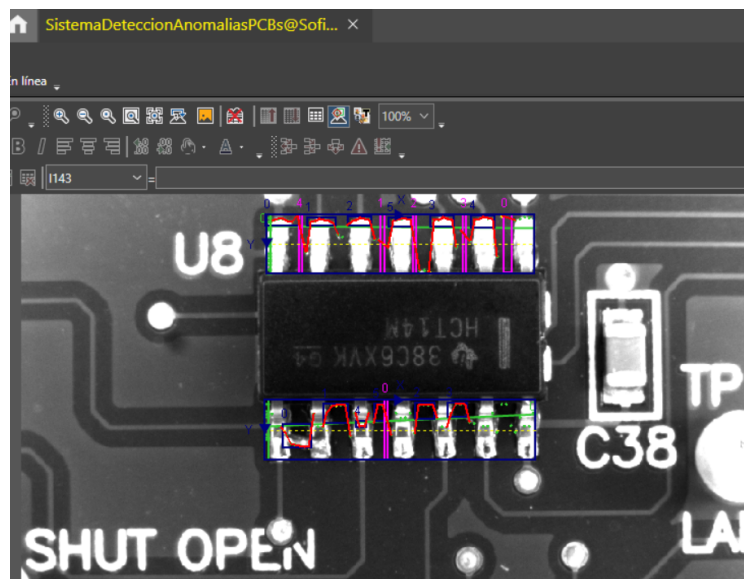
**Figura 4.29:** PCB 98 L vista completa desde el emulador Visual Suite de la cámara 3808.



**Figura 4.30:** PCB 98 L vista con acercamiento a componentes. Emulador Visual Suite de la cámara 3808.

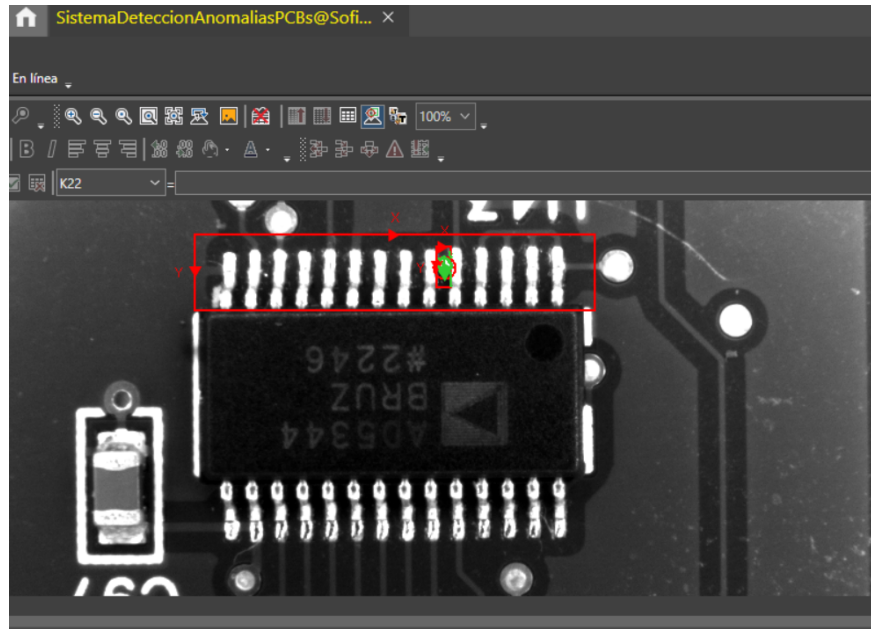
Para la detección de anomalías por soldadura en las PCBs, se utilizó una de las herramientas de visión basada en reglas. Se consideró el uso de tres técnicas de inspección: coincidencia de patrón, blobs e inspección avanzada de bordes. Todas estas herramientas son útiles en aplicaciones de inspección donde se requiere localizar un cambio en una región específica de la imagen, buscar una forma o revisar la existencia de perturbaciones en espacios.

En la figura 4.31 se muestra la técnica de bordes avanzados aplicada a uno de los componentes de la PCB. Los espacios vacíos se marcan con rectángulos rosados en la imagen. El análisis realizado con esta herramienta no permite detectar todos los espacios vacíos entre los pines debido al efecto de la iluminación sobre ellos. La luz puede hacer que los bordes de cada pin parezcan difuminados, lo que impide que la técnica localice todos los bordes necesarios para definir los espacios. Por ello, se descartó esta herramienta para este tipo de componentes.



**Figura 4.31:** Herramienta de bordes avanzados aplicada a componente de la PCB 98 L.

La herramienta de coincidencia de patrones permite identificar patrones circulares en el caso de bolas de soldadura (figura 4.32) y patrones rectangulares para puentes de soldadura. Sin embargo, esta técnica depende de la similitud del elemento detectado con el patrón. Al no poder determinar el tamaño de todas las posibles anomalías (bolas y puentes), se descartó su funcionalidad en el proyecto. De esta forma, se busca evitar falsos negativos en la inspección.

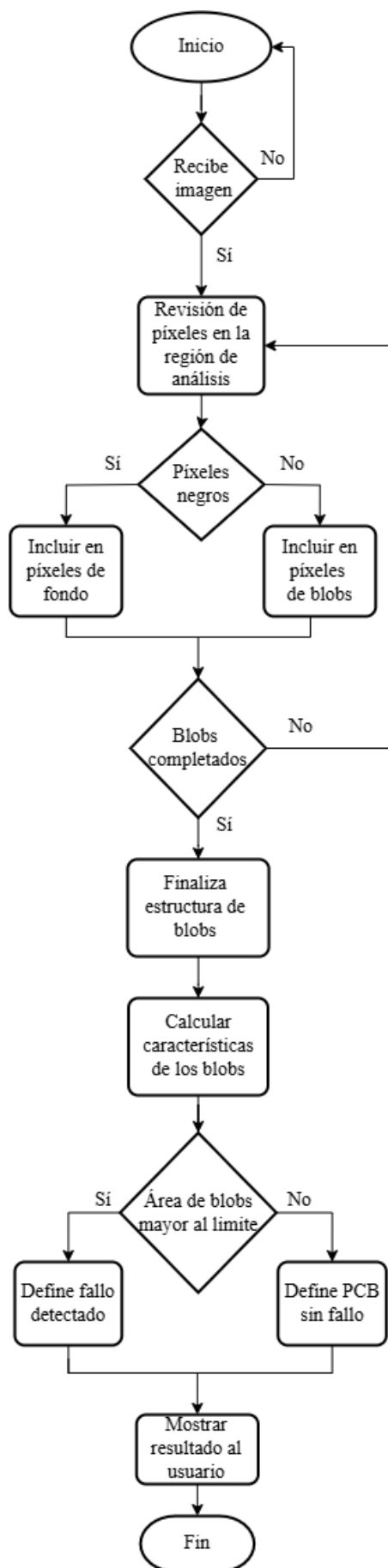


**Figura 4.32:** Herramienta de coincidencia de patrones aplicada a fallo por bola de soldadura. Pines superiores. Emulador Visual Suite de la cámara 3808.

Se decidió utilizar la técnica de detección de blobs para ambas fallas de soldadura. Esta técnica identifica los grupos de píxeles claros (pines) conectados entre píxeles oscuros (espacios vacíos) y los extrae. Se muestran características como la posición horizontal, la posición vertical, el ángulo, el área, la elongación, el perímetro, los orificios y la extensión.

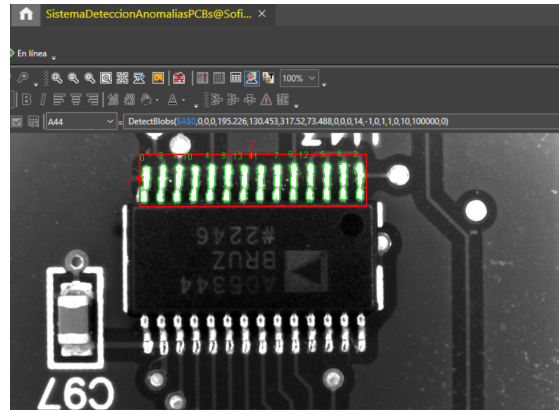
Se utilizó la característica de área para determinar la existencia de anomalías. Si el área de alguno de los pines supera el límite establecido, será catalogado como un error. Esta técnica elimina los problemas relacionados con los distintos tamaños de bolas y puentes. Además, no requiere bordes completamente definidos, sino que se basa en el contraste de píxeles. Se consideró que esta técnica permite una determinación correcta de las anomalías en los distintos componentes de la PCB. El diagrama de flujo del proceso antes descrito se muestra en la figura 4.33.

Para configurar esta técnica se debe definir una zona de inspección y la cantidad de blobs que se desean identificar. Además, es necesario definir de qué color serán los blobs y de qué color es el fondo con el fin de realizar correctamente la segmentación de la imagen. Los blobs detectados se marcarán en color verde.

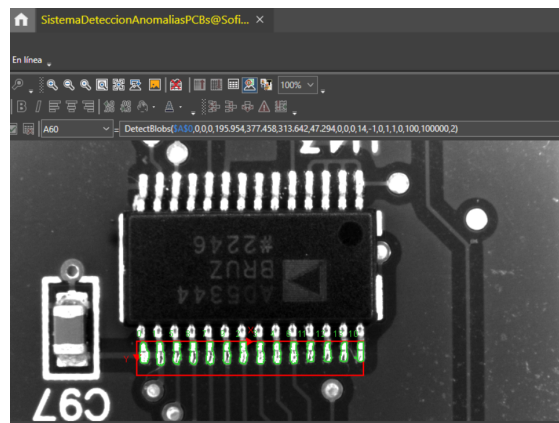


**Figura 4.33:** Diagrama de análisis de fallas por soldadura mediante la herramienta de blobs. Elaboración propia.

Para el componente en inspección, se determinó la zona de análisis como la línea de pines, el número de blobs correspondiente a la cantidad de pines, el color del blob como blanco y el fondo como negro. La configuración se realizó para los pines superiores (figura 4.34) e inferiores (figura 4.35) de cada componente.



**Figura 4.34:** Técnica de detección de blobs aplicada a fallas por bolas de soldadura en pines superiores. Emulador Visual Suite de la cámara 3808.



**Figura 4.35:** Técnica de detección de blobs aplicada a fallas por bolas de soldadura en pines inferiores. Emulador Visual Suite de la cámara 3808..

La programación se llevó a cabo en la hoja de cálculo del programa In-Sight Vision Suite. Para cada línea de pines del componente a inspeccionar, se realiza el análisis de áreas. La técnica muestra los pines ordenados por área, por lo que se revisa únicamente el pin con la mayor área. Los resultados son indicados al usuario como “Fallo detectado” (si ha sido ubicada una anomalía) y “PCB sin fallo” (cuando no hay presencia de anomalías).

En la figura 4.36 se muestra la programación de los pines superiores. Se presentan los datos de nueve pines, con valores de área cercanos a 550 píxeles. Se determinó un fallo como cualquier área mayor a 587 píxeles. En la figura 4.37, se observa como la programación realizada identificó un pin con un área de 1141 píxeles, lo que indicó un fallo en la PCB.

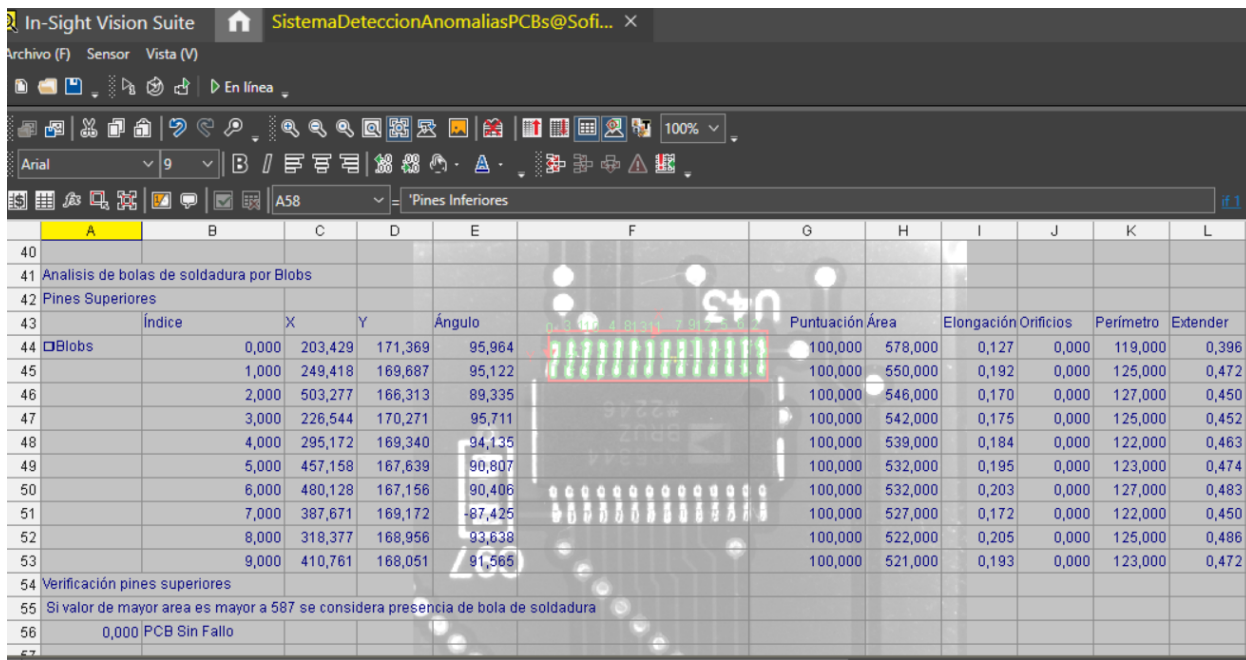


Figura 4.36: Programación de blobs para pines superiores de componentes. Emulador Visual Suite de la cámara 3808.

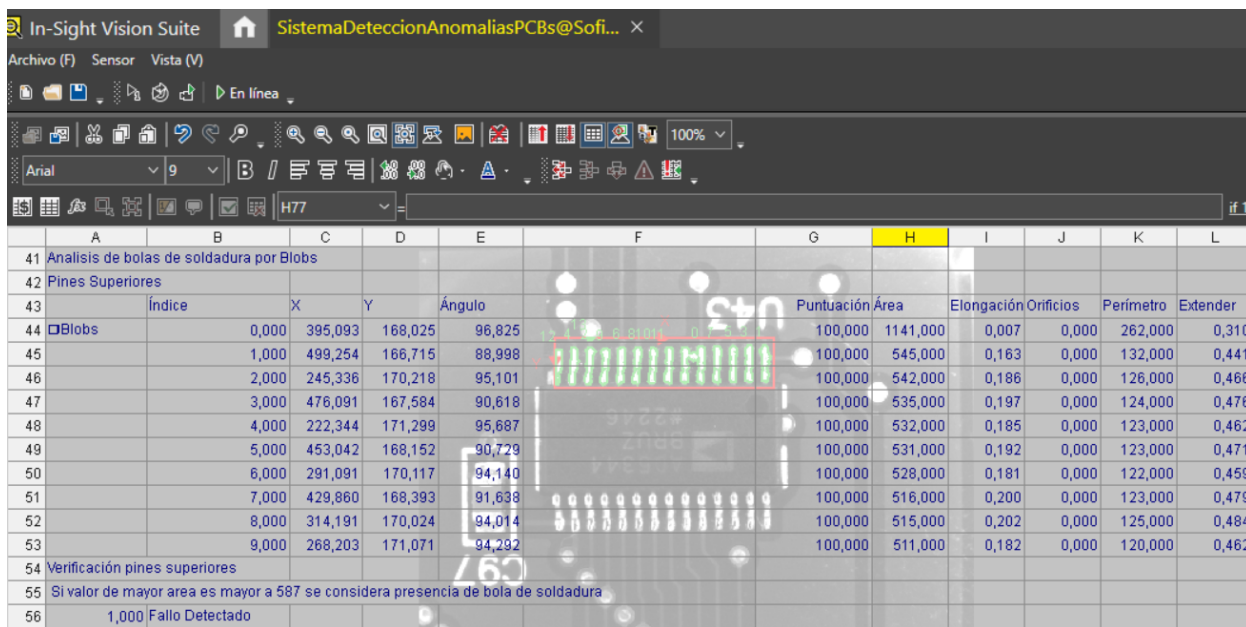


Figura 4.37: Fallo detectado mediante la programación de blobs para los pines superiores del componente. Emulador Visual Suite de la cámara 3808.

En la figura 4.38 se muestra la programación de los pines inferiores. Se observa la información de nueve pines, con valores de área cercanos a 325 píxeles. Se determinó un fallo como cualquier área mayor a 330 píxeles. En la figura 4.39, se observa como la programación realizada permitió identificar un pin con un área de 452 píxeles, lo que indicó un fallo en la PCB.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
58	Pines Inferiores											
59		Índice	X	Y	Ángulo		Puntuación	Área	Elongación	Orificios	Perímetro	Extender
60	<input checked="" type="checkbox"/>	Blobs	0,000	206,518	394,045	266,287	100,000	325,000	0,026	0,000	74,000	0,230
61			1,000	228,828	394,563	267,024	100,000	320,000	0,056	0,000	80,000	0,294
62			2,000	297,264	393,575	268,057	100,000	305,000	0,053	0,000	78,000	0,287
63			3,000	274,244	393,726	269,246	100,000	297,000	0,059	0,000	77,000	0,301
64			4,000	343,138	393,548	268,901	100,000	293,000	0,052	0,000	76,000	0,284
65			5,000	251,497	393,140	90,905	100,000	289,000	0,055	0,000	78,000	0,291
66			6,000	366,493	393,697	269,049	100,000	289,000	0,059	0,000	78,000	0,297
67			7,000	389,363	393,658	267,453	100,000	285,000	0,054	0,000	73,000	0,287
68			8,000	320,290	393,518	269,343	100,000	281,000	0,062	0,000	78,000	0,307
69			9,000	412,457	393,270	268,400	100,000	278,000	0,052	0,000	73,000	0,284
70	Verificación pines inferiores											
71	Si valor de mayor area es mayor a 330 se considera presencia de bola de soldadura											
72	0,000 PCB Sin Fallo											

**Figura 4.38:** Programación de blobs para pines inferiores de componentes. Emulador Visual Suite de la cámara 3808.

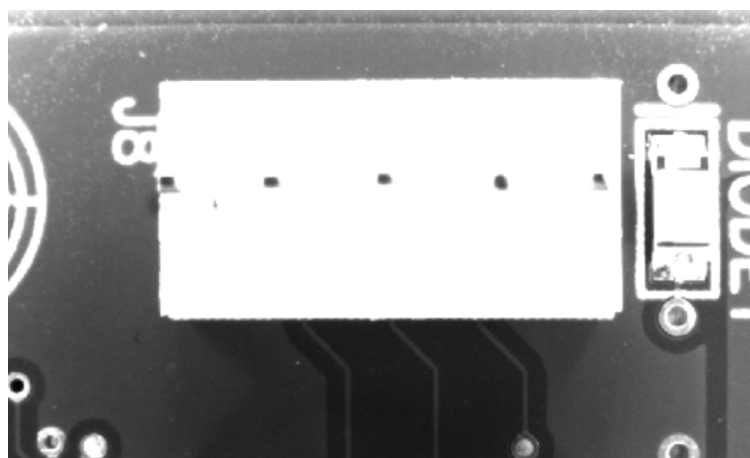
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
58	Pines Inferiores											
59		Índice	X	Y	Ángulo		Puntuación	Área	Elongación	Orificios	Perímetro	Extender
60	<input checked="" type="checkbox"/>	Blobs	0,000	339,418	399,084	268,151	100,000	452,000	0,020	0,000	143,000	0,295
61			1,000	290,850	402,059	268,286	100,000	329,000	0,067	0,000	81,000	0,310
62			2,000	222,228	403,716	266,267	100,000	324,000	0,063	0,000	84,000	0,309
63			3,000	382,777	400,288	267,086	100,000	321,000	0,118	0,000	102,000	0,388
64			4,000	267,840	402,814	269,676	100,000	306,000	0,066	0,000	80,000	0,312
65			5,000	245,022	402,656	90,510	100,000	301,000	0,068	0,000	81,000	0,315
66			6,000	452,401	399,658	-89,611	100,000	292,000	0,105	0,000	94,000	0,373
67			7,000	406,005	402,016	269,149	100,000	287,000	0,073	0,000	78,000	0,318
68			8,000	314,016	403,002	269,677	100,000	281,000	0,074	0,000	78,000	0,325
69			9,000	200,940	404,251	265,917	100,000	273,000	0,035	0,000	69,000	0,253
70	Verificación pines inferiores											
71	Si valor de mayor area es mayor a 330 se considera presencia de bola de soldadura											
72	1,000 Fallo Detectado											

**Figura 4.39:** Fallo detectado mediante la programación de blobs para los pines inferiores del componente. Emulador Visual Suite de la cámara 3808.

### 4.3.3. Detección de fallos por pines torcidos

La detección de fallos por pines torcidos es comúnmente analizada desde la vista lateral de los pines. De esta forma se busca evitar afectaciones de perspectiva ocurridas al utilizar las lentes estándares. Sin embargo, siendo la mayoría de los componentes de la PCB convenientes de analizar desde la vista superior y planteando en el proyecto el uso de una única cámara se decidió no analizarlos desde la vista lateral.

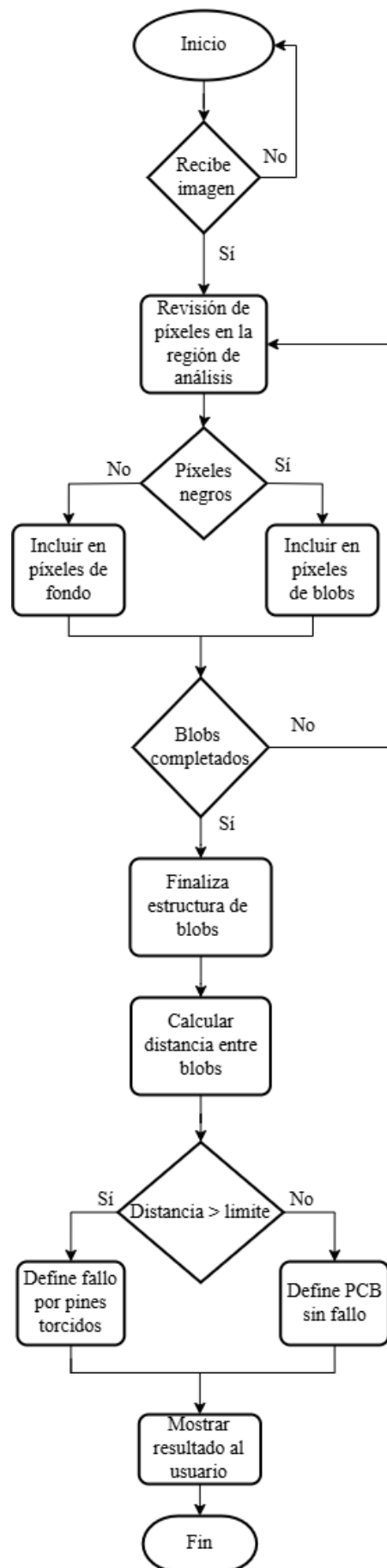
Para un análisis sencillo desde la vista superior, se utiliza una lente telescópica, ya que estas evitan los fallos por perspectiva. Sin embargo, dado que las lentes telescópicas representan un mayor costo, se buscó una alternativa utilizando una lente estándar. Se empleó un mayor nivel de apertura de luz para lograr que los pines aparecieran como puntos de color negro. De este modo, al determinar la distancia entre los puntos, se pueden identificar cambios que indican que un pin está torcido. La imagen obtenida para aplicar esta técnica se muestra en la figura 4.40.



**Figura 4.40:** Captura de pines para análisis, apertura de  $f=8$ . Elaboración propia.

La programación se realizó en la hoja de cálculo del programa de Insight Visual Suite. Primeramente, se utilizó la técnica de blobs para identificar cada uno de los pines y, seguidamente, se aplicó la herramienta de medición de distancias entre blobs. De esta forma se obtuvo la distancia entre blobs consecutivos, se determinó una distancia estándar y otra distancia a partir de la cual se considera un fallo. Se utilizó la normativa para establecer el margen de aceptabilidad. El diagrama de flujo del proceso antes descrito se muestra en la figura 4.41.

En la figura 4.42 se presenta la programación realizada, en la cual se definieron las zonas de blobs y las distancias entre pines consecutivos (señaladas en rojo y verde en la figura 4.43, respectivamente). Se determinó para cada pin un margen de aceptabilidad de 50 % del ancho del pin. En caso de que alguna de las distancias supere el valor establecido se muestra al usuario un mensaje de “Falla detectada en pines”, de lo contrario un mensaje de “Pines sin fallo”.



**Figura 4.41:** Diagrama de análisis de fallas por pines torcidos por medio de la herramienta de blobs y distancia entre blobs. Elaboración propia.

In-Sight Vision Suite [Tarea no guardada]@SofiaValverde

Archivo (F) Sensor Vista (V)

En línea

Arial 9

N6

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	Image												
2	Generación de Blobs												
3		Indice	X	Y	Ángulo	Color	Puntuación	Área	Bongación	Orificios	Perímetro	Extender	
4	Blobs	0,000	179,464	216,005	252,045	0,000	100,000	216,000	0,003	0,000	56,000	0,180	
5		Indice	X	Y	Ángulo	Color	Puntuación	Área	Bongación	Orificios	Perímetro	Extender	
6	Blobs	0,000	285,162	212,676	179,711	0,000	100,000	142,000	0,004	0,000	42,000	0,174	
7		Indice	X	Y	Ángulo	Color	Puntuación	Área	Bongación	Orificios	Perímetro	Extender	
8	Blobs	0,000	401,885	209,608	185,719	0,000	100,000	130,000	0,002	0,000	40,000	0,166	
9		Indice	X	Y	Ángulo	Color	Puntuación	Área	Bongación	Orificios	Perímetro	Extender	
10	Blobs	0,000	522,418	212,892	245,677	0,000	100,000	158,000	0,001	0,000	43,000	0,164	
11		Indice	X	Y	Ángulo	Color	Puntuación	Área	Bongación	Orificios	Perímetro	Extender	
12	Blobs	0,000	623,733	209,845	227,138	0,000	100,000	116,000	0,003	0,000	40,000	0,175	
13													
14	Distancias		X0	Y0	X1	Y1	Ángulo	Distancia	Margen	Aceptabilidad			
15	Blob 1 y Blob 2	Dist	186,000	219,000	278,000	215,000	-2,490	92,087	5,000	97,087			
16	Blob 2 y Blob 3	Dist	292,000	214,000	395,000	209,000	-2,779	103,121	5,000	108,121			
17	Blob 3 y Blob 4	Dist	408,000	208,000	516,000	212,000	2,121	108,074	5,000	113,074			
18	Blob 4 y Blob 5	Dist	528,000	213,000	618,000	210,000	-1,909	90,050	5,000	95,050			
19													
20	Verificación												
21	Se define distancias mayores a las determinadas en la Aceptabilidad como un fallo detectado												
22	Blob 1 y Blob 2	Dist	0,000										
23	Blob 2 y Blob 3	Dist	0,000										
24	Blob 3 y Blob 4	Dist	0,000										
25	Blob 4 y Blob 5	Dist	0,000										
26	Suma	Dist	0,000	Pines sin fallo									

Figura 4.42: Programación realiza para pines torcidos. Pines base. Emulador Visual Suite de la cámara 3808.

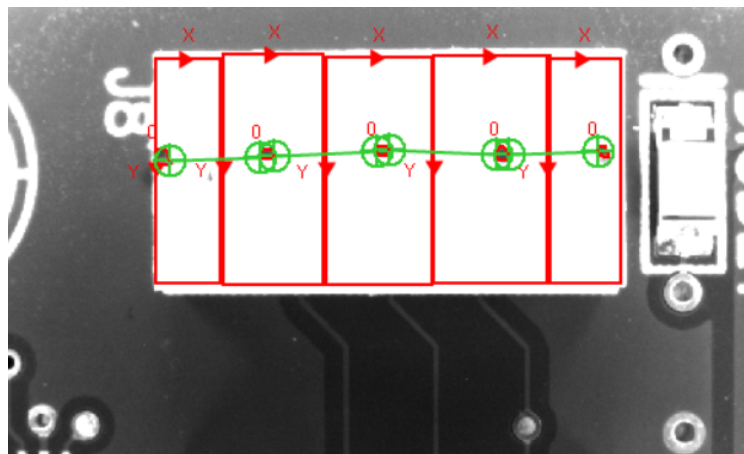


Figura 4.43: Imagen sin anomalías analizada para pines torcidos.

En la figura 4.44 se presenta un caso en el que uno de los pines superó la distancia establecida y se determinó como torcido. El segundo pin, de izquierda a derecha, muestra una distancia al primer pin de 101.592 píxeles, lo cual es superior a la base marcada de 97.087 píxeles.

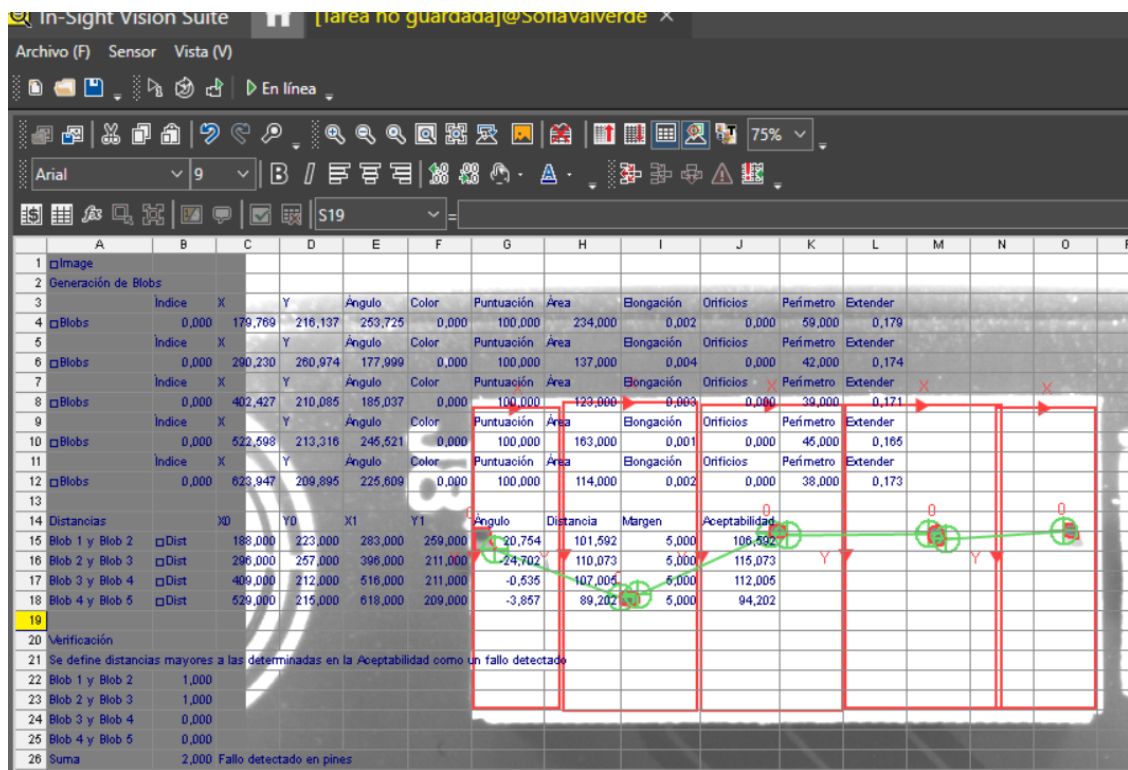


Figura 4.44: Fallo detectado en segundo pin. Emulador Visual Suite de la cámara 3808.

#### 4.3.4. HMI del sistema

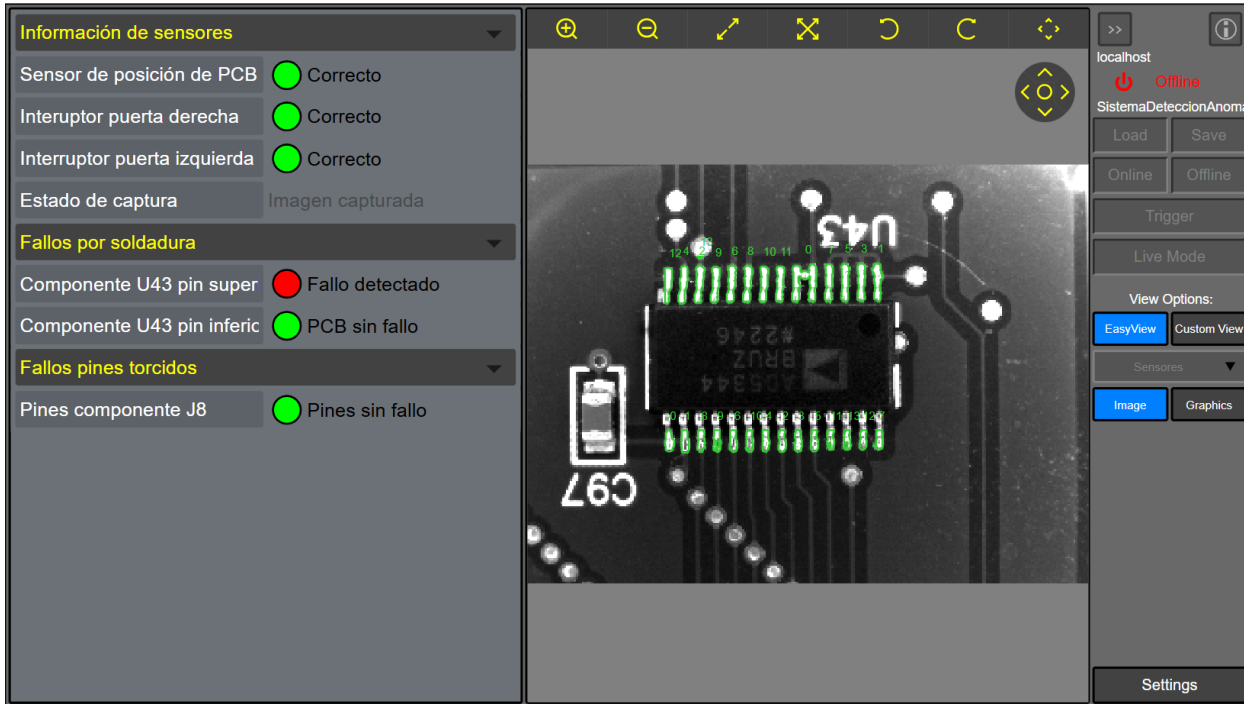
La interacción del operario con el sistema permite mejorar los tiempo de producción. Por lo cual, la HMI diseñada debe ser amigable con el usuario, intuitiva y brindarle toda la información necesaria para el proceso de detección.

Para el sistema de inspección, se diseñó una interfaz de usuario utilizando las herramientas del programa In-Sight Vision Suite de la cámara seleccionada. Esta da una plantilla base con acceso a opciones de visualización, cargar proyectos, acercamientos de la imagen capturada, rotación de la imagen capturada, guardar inspecciones y capturar la imagen. Además, permite mostrar los resultados con luces, crear etiquetas y grupos de visualización.

Se decidió mostrar la información relacionada a las condiciones de inicio del sistema: sensor de posición de la PCB, interruptores de cierra de puertas y estado de captura de la imagen. Estos se engloban en una pestaña denominada información de los sensores.

Para informar sobre el estado de cada uno de los componentes en la PCB 98 L, se crearon dos grupos: uno destinado a fallos por soldadura y otro a fallos de pines torcidos. Al desplegar la opción de fallos por soldadura es posible encontrar el nombre de los componentes donde es común esta anomalía. Se estudia cada componente a nivel de pines inferiores y pines superiores. El formato para cada etiqueta corresponde a “Componente Nombre pin superior” “Componente Nombre Pin inferior”. De la misma forma se puede desplegar la opción de fallos de pines torcidos y se obtiene el estado de cada conjunto de pines indicados por su nombre. La nomenclatura utilizada corresponde a “Pines componente Nombre”.

Se utilizaron luces de color verde y rojo para notificar el estado de los sensores y componentes. En el caso de los sensores, el círculo verde indica su activación, mientras que el amarillo advierte al usuario que debe revisar el elemento inspeccionado. Para las fallas en los componentes, el círculo verde indica que no se presenta ningún fallo, mientras que el círculo rojo alerta al usuario sobre un fallo detectado. En la figura 4.45 se muestra la interfaz HMI diseñada para el sistema.



**Figura 4.45:** HMI diseñada para el sistema de detección de anomalías en PCBs. Elaboración propia.

Aunque se utilizó el programa de la cámara In-Sight 3808, solo se tuvo acceso a imágenes de menor resolución, lo que impidió mostrar todos los componentes en el diseño al mismo tiempo y aplicar las herramientas de análisis. Cabe aclarar que en la figura 4.45 solo se muestra el resultado relacionado con la imagen presente; el círculo verde en los pines se coloca de forma ilustrativa.

# Capítulo 5

## Validación del diseño y análisis de resultados

En este capítulo se definen las pruebas de validación para el diseño propuesto. Se incluyen las decisiones, herramientas y pasos necesarios para la ejecución de cada prueba. Además, se presentan los resultados obtenidos junto con su respectivo análisis.

Se dedica una sección a la estructura para la captura de imágenes, donde se indican las simulaciones realizadas, así como sus resultados e implicaciones para el proyecto. También, se incluye una sección para la validación del diseño del software, en la que se presentan tres pruebas realizadas al sistema, sus porcentajes de aprobación y el análisis correspondiente de los resultados.

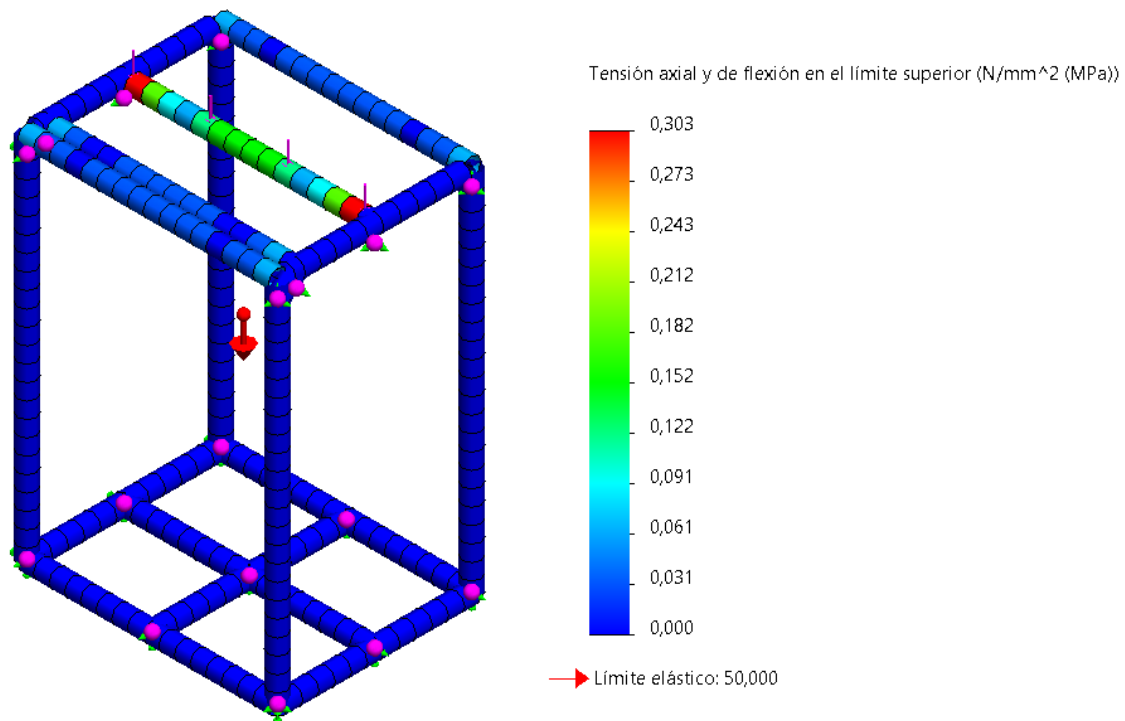
### 5.1. Estructura para la captura de imágenes

El sistema de montaje y captura de la imagen no se ve expuesto a cargas en movimiento, por ello, para verificar el diseño, se realizó un análisis estático. Considerando el posicionamiento de las cargas en la estructura, se definió una de las vigas superiores como la expuesta a mayor esfuerzo. Este componente se identificó como crítico del sistema, ya que es el encargado de soportar toda la fuerza generada por la lente, la cámara, la iluminación y los soportes respectivos. Se tomó en cuenta que el peso de la lente es de 0.2 kg, el peso de la cámara es de 0.57 kg, el peso del soporte de la iluminación es de 0.614 kg, el peso de la iluminación es de 0.610 kg y el peso del soporte de la cámara es de 0.07 kg. Mediante la ecuación 5.1, se calculó la fuerza ejercida por dichos componentes, resultando en un valor de 20.25 N.

$$Fuerza = (0,2 + 0,57 + 0,614 + 0,07 + 0,610)kg * 9,81m/s^2 = 20,25N \quad (5.1)$$

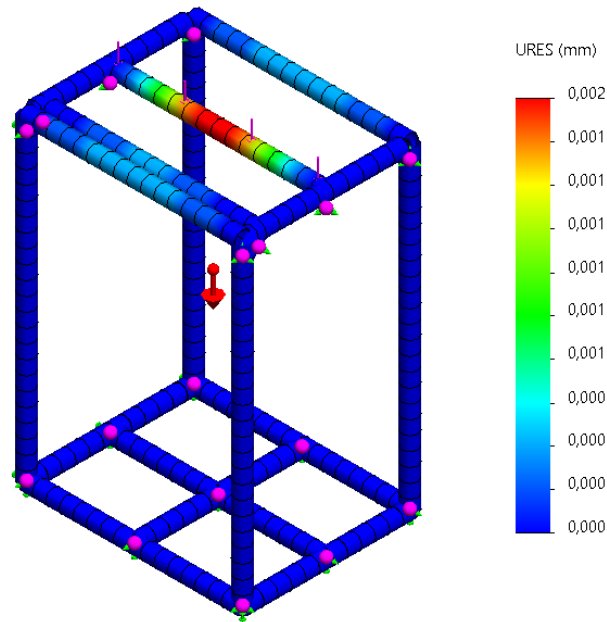
Con base en el resultado de la ecuación 5.1, se realizó un análisis de fuerzas estáticas. Se tomó en cuenta que el material de la viga de soporte es aluminio 6063 anodizado. Para llevar a cabo este análisis, se definieron, como se muestra en la figura 5.1 y en la figura 5.2, los

puntos de unión entre las vigas como puntos fijos (puntos rosados) y se asignó la carga de 20.25 N como distribuida en la viga (flechas rosadas). Además, se contempló el efecto de la gravedad (flecha naranja) sobre la viga. Como se aprecia en la figura 5.1, se obtuvo un valor de esfuerzo máximo de 0.303 MPa, lo cual resultó ser inferior al límite elástico del material, que era de 50 MPa.



**Figura 5.1:** Resultado de análisis de tensión y flexión en la estructura. Solidworks. Elaboración Propia.

En la figura 5.2 se presenta el resultado de los desplazamientos debidos a la carga. Se obtuvo un desplazamiento máximo de 0.002 mm. El desplazamiento máximo obtenido no representa una afectación a la estructura. Por otro lado, se obtuvo un factor de seguridad de 165, indicando la estructura soporta con facilidad la carga asignada y puede llegar a soportar aun mucha más carga. Este valor es bastante alto, lo cual se debe a la carga asignada, el material de la estructura y las características de los perfiles estructurales.

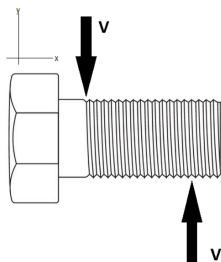


**Figura 5.2:** Resultado de la simulación de los desplazamientos en la estructura. Solidworks. Elaboración propia

Adicionalmente, se identificaron como componentes con alta carga los dos tornillos responsables de unir la viga al resto de la estructura. Estos tornillos reciben la fuerza ocasionada por el peso del lente, la cámara, el soporte de la iluminación, la iluminación y el soporte de la cámara. La fuerza calculada fue de 20.25 N. (ecuación 5.1).

Los tornillos corresponden a tornillos autorroscables para perfil 6 y su material es acero galvanizado. En la figura 5.3 se presenta el diagrama de cuerpo libre de un tornillo sometido a dicha carga. La fuerza cortante en cada tornillo es de 10.125 N. Se determinó, por medio de la ecuación 5.2, que el esfuerzo cortante en un tornillo es de 515.66 kPa. A partir de las características mecánicas del acero galvanizado, se utilizaron la ecuación 5.3 y la ecuación 5.4 para obtener un factor de seguridad de 332 [64].

El valor obtenido de factor de seguridad garantiza que la unión no se verá afectada por la fuerza aplicada.



**Figura 5.3:** Diagrama de cuerpo libre del tornillo para la viga. Elaboración propia

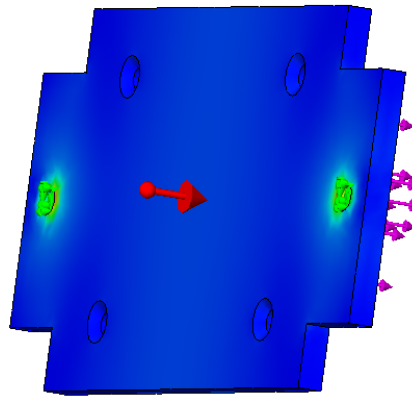
$$\tau = \frac{20,25N}{\frac{2\pi(0,005m^2)}{4}} = 515,66kPa \quad (5.2)$$

$$S_{sy} = 0,57(420MPa) = 171MPa \quad (5.3)$$

$$n = \frac{171MPa}{515,66kPa} = 332 \quad (5.4)$$

Para complementar la validación del diseño, se ejecutó un análisis estático al soporte de la cámara y al soporte de la iluminación. Se consideró que el material para ambos era aluminio 6061. En el análisis del soporte de la cámara, como se aprecia en la figura 5.4, se definieron como zonas de soporte las uniones a la viga mediante tornillería (flechas verdes) y se aplicó la carga vertical (flechas rosadas). Además, se contempló el efecto de la gravedad (flecha roja). Se tomó en cuenta que el peso del lente es de 0.2 kg y el de la cámara de 0.57 kg. Mediante la ecuación 5.5, se calculó la fuerza ejercida por dichos componentes al soporte, resultando en 7.55 N. Según el análisis estático realizado a la pieza, se definió un esfuerzo máximo de 3.21 MPa, una deflexión máxima de 0.003 mm y un factor de seguridad de 17.

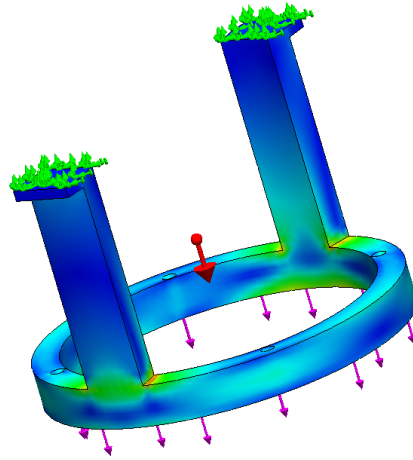
$$Fuerza = (0,2 + 0,57)kg * 9,81m/s^2 = 7,55N \quad (5.5)$$



**Figura 5.4:** Simulación de esfuerzos del soporte de la cámara y la lente. Elaboración propia.

Para el análisis del soporte de la iluminación, como se aprecia en la figura 5.4, se definieron como zonas de soportes fijos las uniones a la viga mediante tornillería (zonas verdes) y se aplicó la carga vertical (flechas rosadas). Además, se contempló el efecto de la gravedad (flecha roja). Se tomó como carga el peso de la iluminación, el cual es de 0.610 kg. Mediante la ecuación 5.6, se calculó la fuerza ejercida por dicho componente, resultando en 5.9841 N. Según el análisis estático realizado a la pieza, se definió un esfuerzo máximo de 0.173 MPa, una deflexión máxima de 0.001 mm y un factor de seguridad de 317.

$$Fuerza = 0,610kg * 9,81m/s^2 = 5,9841N \quad (5.6)$$



**Figura 5.5:** Simulación de esfuerzos del soporte de la iluminación. Elaboración propia.

En los resultados de ambos soportes se puede apreciar como los esfuerzos máximos obtenidos no superan y están muy por debajo del límite elástico del material de 55.148 MPa. Las deflexiones máximas obtenidas no llegaron a un valor considerable y los factores de seguridad son altos. Considerando el comportamiento obtenido se determinó que ambos soportes se encuentran en la capacidad de soportar la carga asignada y así garantizar el cumplimiento de la función del sistema.

Para el análisis de los tornillos utilizados en ambos soportes, se consideró el material de acero inoxidable y el uso de tornillos M4 para perfil 6. A partir de la ecuación 5.3, la ecuación 5.7 y la ecuación 5.8, se determinó el factor de seguridad para los tornillos del soporte de la cámara [64]. Un factor de seguridad de 889 indica que la unión es segura para la carga aplicada

$$\tau = \frac{7,55N}{\frac{2\pi(0,005m^2)}{4}} = 192,25kPa \quad (5.7)$$

$$n = \frac{171MPa}{192,25kPa} = 889 \quad (5.8)$$

Para los tornillos utilizados en el soporte de la iluminación, se determinó el factor de seguridad mediante la ecuación 5.3, la ecuación 5.9 y la ecuación 5.10 [64]. El valor obtenido corresponde a 1122 y significa que la unión no permanente no representa un riesgo para la estructura.

$$\tau = \frac{V}{A} = \frac{5,9841N}{2\pi(0,005)^2 m^2} = 152,38kPa \quad (5.9)$$

$$n = \frac{171MPa}{152,38kPa} = 1122 \quad (5.10)$$

A partir de las pruebas estáticas y análisis realizado a los resultados, se determinó que la estructura puede soportar la carga asignada y ejecutar la función para la cual fue diseñada sin altas probabilidades de fallo.

## 5.2. Software de detección de fallas

Para la validación del sistema, por motivos económicos no fue posible el uso de los sensores seleccionados ni de la cámara Insight 3808. Como alternativa, se buscó acceder a una cámara de visión industrial de menor gama. El Laboratorio de Visión de la Escuela de Ingeniería Mecatrónica permitió el uso de una cámara Cognex 7200, esta cámara está diseñada con un conjunto completo de potentes algoritmos de visión y funciones prácticas para resolver aplicaciones de inspección de forma fácil y confiable [65]. En la tabla 5.1 se presenta una comparativa entre la cámara seleccionada para el proyecto y la cámara disponible para la validación.

**Tabla 5.1:** Comparación entre la cámara seleccionada para la propuesta y la cámara disponible para la validación [19] [20].

Rubro	Cámara Insight 3808	Cámara Insight 7200
Resolución	2840 x 2840 píxeles	800 x 600 píxeles
Bits	8 bits monocromática	8 bits monocromática
Software	In-Sight Versión 24.2.1	In-Sight Versión 5.9.0
Herramientas de inspección	Visión. Geometría. Gráficos. Matemáticas. Texto. Transformación de coordenadas.	Visión. Geometría. Gráficos. Matemáticas. Texto. Transformación de coordenadas.
Tipo de sensor	2/3" CMOS	1/1.8-inch CMOS
Propiedades del sensor	5.3 mm diagonal 5.3 x 5.3 $\mu m^2$ píxeles	11.1 mm diagonal, 2.74 x 2.74 $\mu m^2$ píxeles
Velocidad de disparo	22 $\mu s$ a 200,000 $\mu s$	16 $\mu s$ a 950 ms
Memoria de Programa	7,2 GB	512 MB
Memoria de procesamiento de imágenes	512 MB	256 MB
Entradas	3 entradas	3 entradas
Salidas	4 salidas	4 salidas

A partir del tabla anterior, se determinó que la validación del sistema mediante la cámara de gama baja es factible. El software de la cámara Insight 7200 a pesar de ser una versión menor comparte muchas características con el de la cámara Insight 3808. La cámara de gama baja

presenta las mismas herramientas con diferencias en robustez, lo cual no afecta la naturaleza de la técnica. Además, ambas cámaras permiten el uso de la HMI virtual.

Las principales diferencias corresponden al tamaño de la imagen y memoria. Sin embargo, la validación busca respaldar las técnicas seleccionadas y mostrar mejoras en porcentajes de detección, por lo cual estas características no afectan el resultado. Debido a la diferencia en el tamaño de la imagen, se decidió evaluar componentes específicos, dejando claro que en una implementación con la cámara Insight 3808 el entrenamiento se hace a todos los componentes en una misma imagen. La cámara Insight 7200 utilizada se muestra en la figura 5.6.



**Figura 5.6:** Cámara Cognex 7200 utilizada para la validación. Propiedad del Tecnológico de Costa Rica

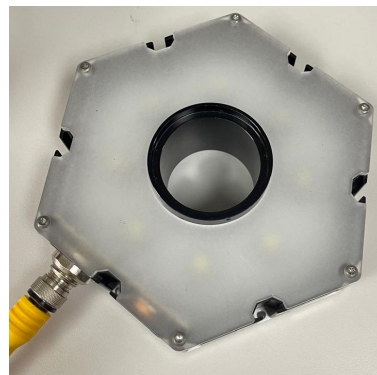
Se llevó a cabo la construcción de un prototipo para la captura de imágenes. Para ello, se utilizó un soporte de prensas con altura ajustable (figura 5.7). Este soporte se fijó a la mesa del laboratorio mediante una prensa y a la cámara a través de tornillería. El soporte se posicionó de manera que la cámara estuviera a una altura de 6 cm respecto a la superficie de la mesa.

La cámara y la iluminación se alimentaron mediante fuentes de 24 V. En la figura 5.8 se presenta la iluminación de anillo de luz difusa, a esta se le aplicó un filtro para difuminar aún más la luz que recibirían los componentes. La base para la PCB fue impresa en 3D usando dos piezas (figura 5.9). La base presenta aperturas entre las partes para que estas se ajusten y esto no afecte su funcionalidad.

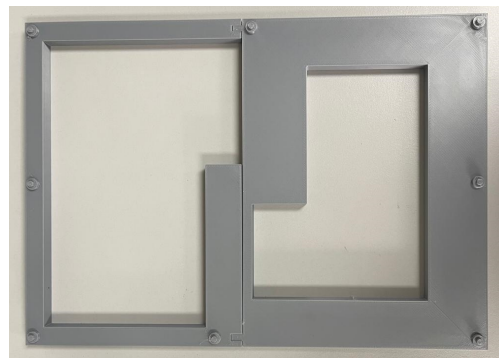
La iluminación se colocó alrededor de la cámara, como se aprecia en la figura 5.10, y la base para la PCB se fijó a la mesa con cintas para preservar la posición de las tarjetas en todas las capturas.



**Figura 5.7:** Soporte para la cámara.

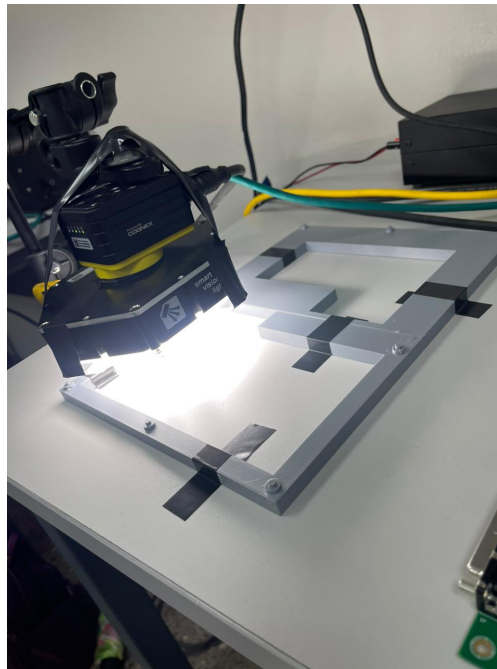


**Figura 5.8:** Iluminación tipo anillo de luz difusa utilizado para la validación. Propiedad del Tecnológico de Costa Rica



**Figura 5.9:** Base diseñada para las PCBs. Elaboración propia.

En la figura 5.10 se presentan los elementos antes mencionados integrando el prototipo para la captura de las imágenes. Una vez concluido el montaje del prototipo, se conectó la cámara a la PC y se inició el programa Insight Visual Suite 5.9.0. En la figura 5.11 se observa una PCB colocada en el prototipo del sistema. Se aclara que no fue necesario el uso de una estructura de aislamiento, ya que el Laboratorio de Visión corresponde a un ambiente controlado.



**Figura 5.10:** Montaje de la cámara y base de la PCB en posición fija para la validación. Elaboración propia.

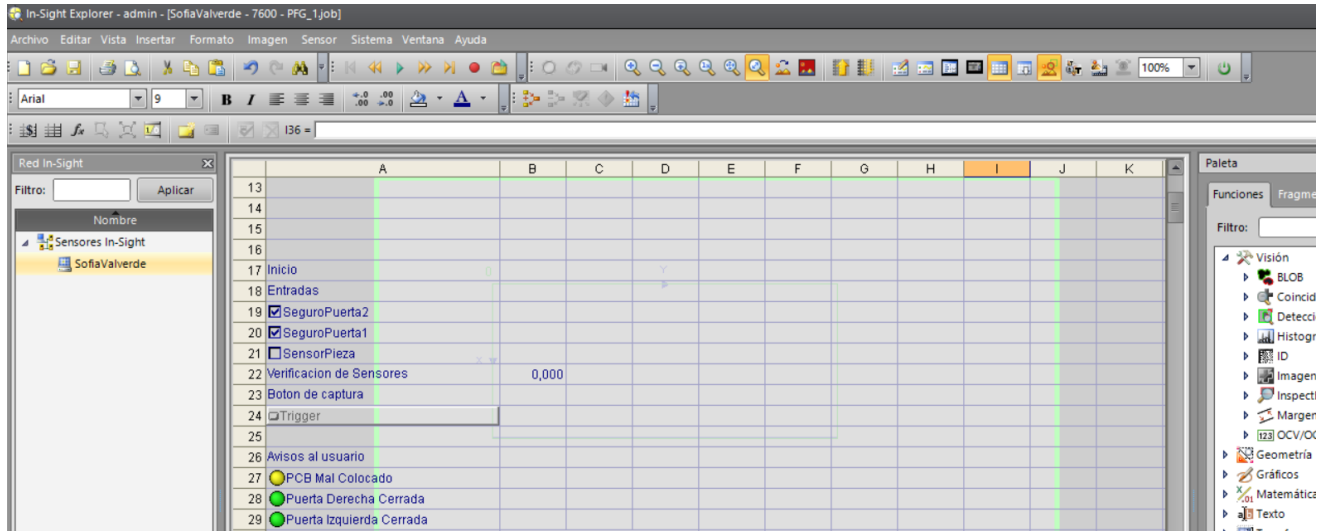


**Figura 5.11:** Colocación de la PCB en el sistema de validación. Elaboración propia.

Para la validación, se llevó a cabo toda la programación en el Insight Visual Suite 5.9.0 de la cámara Insight 7200. Se aclara que no se realizó la conexión física del sensor e interruptores debido a que estos deben ser compatibles con las cámaras industriales, y su precio es muy elevado para la validación. Además, para su conexión sería necesario manipular el cable de PWR de la cámara, lo cual no está permitido en el laboratorio.

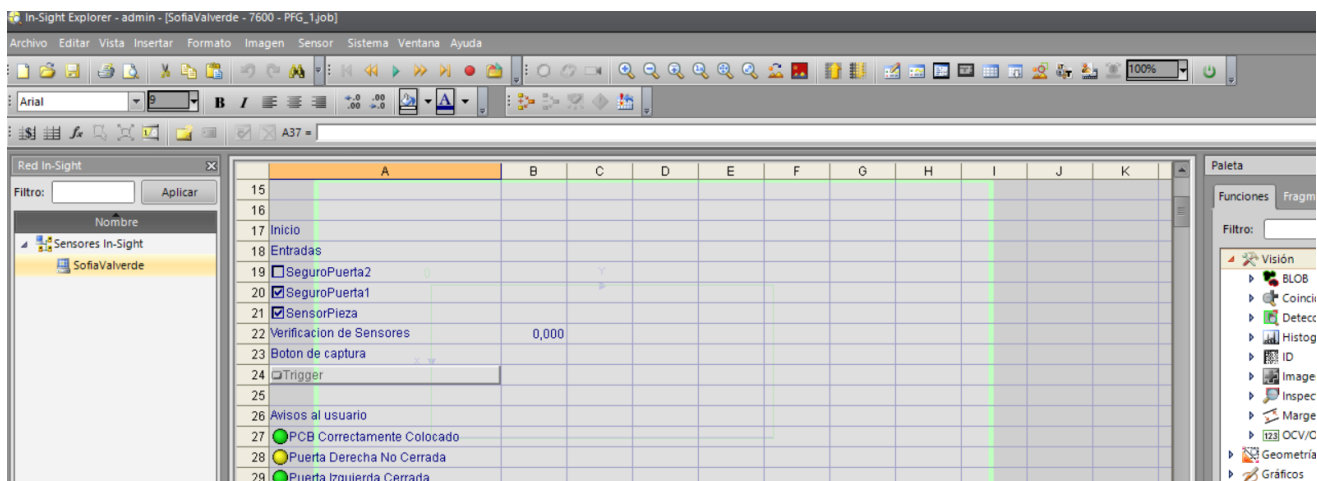
Se validaron el sensor y los interruptores mediante simulación. En el programa, se crearon las entradas de los dos interruptores para las puertas y la entrada del sensor de posición de la tarjeta. Estos se configuraron para activar la opción de captura de imagen (“trigger”) al ser todos detectados. También se incluyó el sistema de alertas para indicar al usuario si alguno de los sensores no está activo.

En la figura 5.12 se muestra en la simulación que uno de los sensores no está activado, por lo cual no se habilitó la opción de “trigger” y se indicó con color amarillo al usuario que la entrada del sensor no se activó.



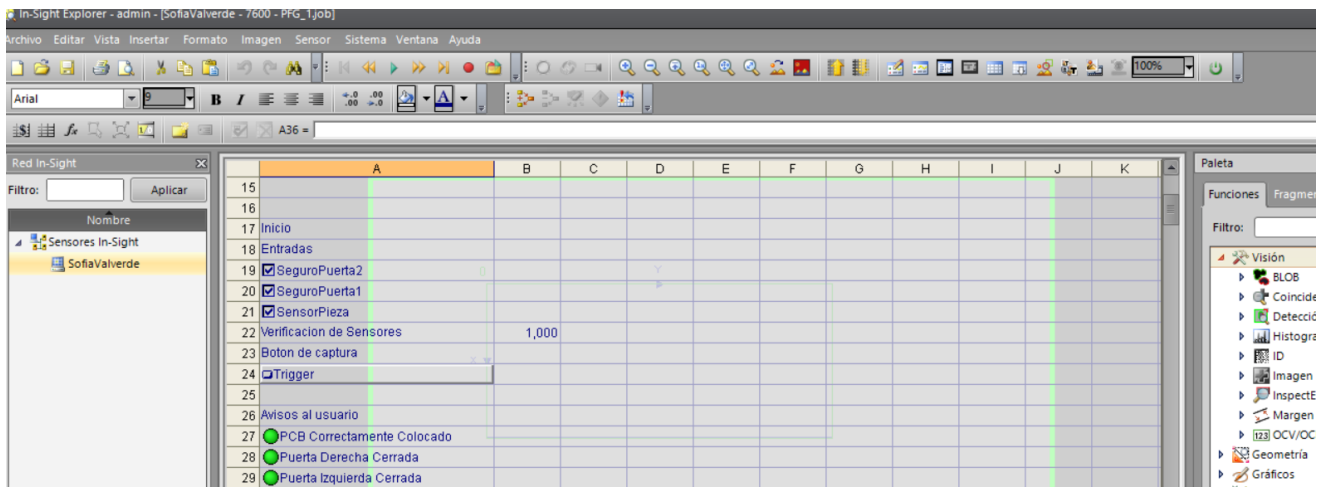
**Figura 5.12:** Simulación de conexión de sensores y captura de imagen, no activación de sensor de PCB. Insight Visual Suite 5.9.0. Elaboración propia

Se realizó otra simulación (figura 5.13) en la que uno de los interruptores de puerta no está activado, por lo que no se habilitó la opción de “trigger”. En este caso, se indicó con color amarillo al usuario que la puerta correspondiente no está correctamente cerrada.



**Figura 5.13:** Simulación de conexión de sensores y captura de imagen, no activación de uno de los interruptores de puerta. Insight Visual Suite 5.9.0. Elaboración propia.

En la figura 5.14 se presenta la activación de todas las entradas indicado con color verde en los mensajes al usuario y el botón de “trigger. activado. De esta manera, se validó la iniciación del sistema.



**Figura 5.14:** Simulación de conexión de sensores y captura de imagen, activación de todas las entradas. Insight Visual Suite 5.9.0. Elaboración propia

Las programaciones diseñadas para la detección de anomalías se crearon en la hoja de cálculo del Insight Visual Suite 5.9.0. Según cada componente, se delimitaron los valores de aceptabilidad de área para los fallos por soldadura y la distancia límite entre pines para los fallos por pines torcidos. Para llevar a cabo la validación del sistema, se estableció el tamaño de la muestra revisando todos los registros de la empresa relacionados con la producción de la PCB 98 L

A partir de esta revisión, se obtuvieron los datos de la cantidad total de tarjetas producidas por la empresa y los fallos no detectados. En la tabla 5.2 se presenta un resumen de la información obtenida. Se aclara que los datos corresponden únicamente a dos años, ya que es el tiempo que la empresa lleva produciendo en el país.

**Tabla 5.2:** Resumen de datos de producción de la tarjeta 98 L, datos 2022 - septiembre 2024, Cartago, Costa Rica

Dato	Unidades
Cantidad de tarjetas en lotes donde hubo al menos un fallo	751
Cantidad de tarjetas en lotes que pasaron sin ningún fallo	149
Total de tarjetas producidas por la empresa	900
Fallos en la detección por parte del operario	128

Con estos datos, calculó el porcentaje de aciertos y errores del operario en la identificación de anomalías. Utilizando la ecuación 5.11, se obtuvo un porcentaje de fallos por parte de los operarios del 14.22 %, lo que indica un porcentaje de aciertos del 85.78 % (ecuación 5.12).

$$\text{Operario}_{\%Error} = \frac{100}{900} * 128 = 14,22\% \quad (5.11)$$

$$\text{Operario}_{\%Aciertos} = 100\% - 14,22\% = 85,78\% \quad (5.12)$$

Para el cálculo de la muestra, se empleó la fórmula correspondiente a poblaciones finitas (ecuación 5.13) [66]. Se consideró el promedio de unidades por lote como el tamaño de la población, el cual es de 150 unidades..

$$n = \frac{N * Z_a^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z_a^2 * p * q} \quad (5.13)$$

Donde:

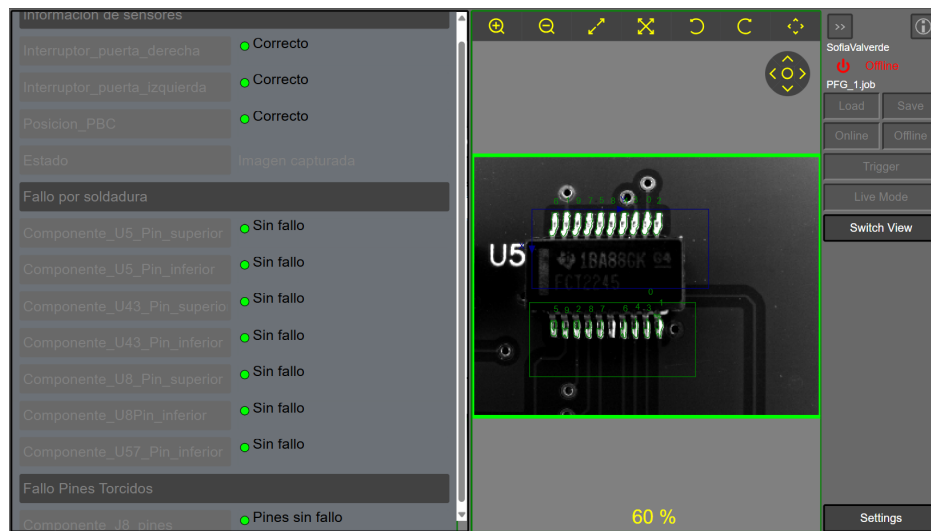
- n = Tamaño de la muestra.
- N = Tamaño de la población.
- Z = Parámetro estadístico que depende del nivel de confianza (1-a).
- e = Error de estimación máximo a aceptar.
- p = Probabilidad favorable para la variable en estudio.
- q = Probabilidad desfavorable para la variable en estudio (1-p).

Se estableció un nivel de confianza (a) del 95 %, lo que, según las tablas estadísticas, corresponde a un valor de Z=1.959 [66]. Los valores de p y q se definieron como el porcentaje de aciertos y fallos del operario, respectivamente. El error máximo de estimación aceptable se fijó en el 10 %. Al aplicar la ecuación 5.13, se obtuvo un tamaño de muestra de 37 unidades (ecuación 5.14).

$$n = \frac{150 * 1,96_{0,95}^2 * 0,85 * 0,15}{0,1^2 * (150 - 1) + 1,96_{0,95}^2 * 0,85 * 0,15} = 37 \quad (5.14)$$

Para mostrar y validar la funcionalidad del diseño, se definió el análisis de cuatro componentes en busca de fallos por soldadura, incluyendo bolas de soldadura y puentes de soldadura. En el caso de los pines, se estudió únicamente un grupo específico presente en la PCB. En la figura 5.15, se presenta la interfaz creada en el programa Insight Visual Suite 5.9.0, que incluye todos los componentes a inspeccionar.

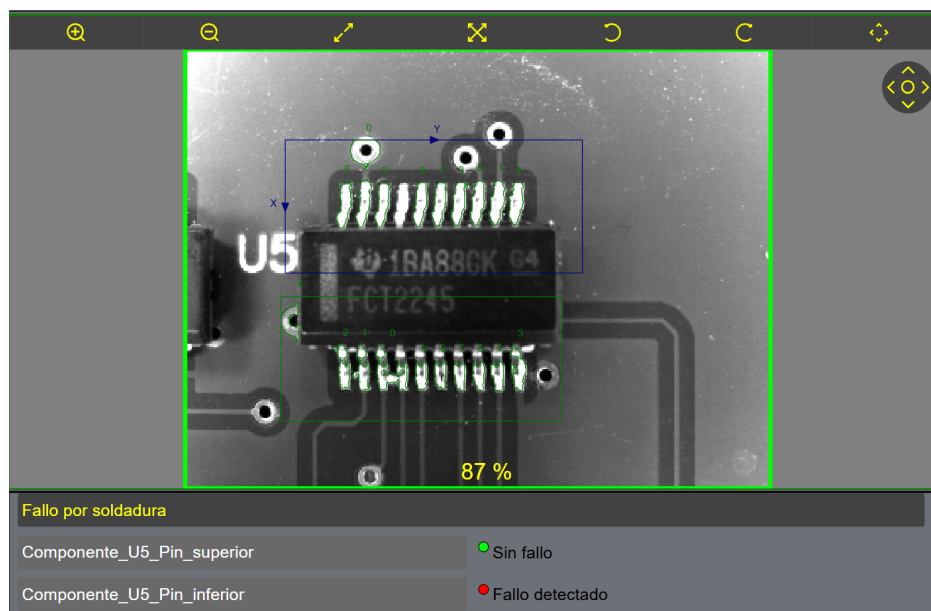
Se observan diferencias entre la interfaz diseñada y la creada para la validación. Estas diferencias son principalmente estéticas, como la imposibilidad de separar correctamente las palabras en las etiquetas, y la falta de opción para agrupar elementos y desplegar la información. Además, no se ofrece acceso a opciones de visualización. Sin embargo, estas discrepancias no afectan el funcionamiento del sistema ni los resultados de la validación.



**Figura 5.15:** HMI para validación del sistema. Insight Visual Suite 5.9.0. Elaboración propia

La primera prueba del sistema se llevó a cabo para detectar fallos por soldadura causados por bolas de soldadura. Se decidió realizar la prueba en los circuitos integrados U5 y U43. Según las entrevistas con ingenieros, estos componentes tienden a presentar este tipo de fallos. Para el componente U5, se aplicó primero la técnica de Blobs en los pines superiores e inferiores, estableciendo un límite de área de 602 píxeles para los pines superiores y 730 píxeles para los pines inferiores. Se revisaron 68 elementos, de los cuales se detectaron con éxito 65 PCBs.

En la figura 5.16 se presenta uno de los hallazgos en el componente U5, donde se muestra una bola de soldadura entre los pines tres y cuatro de la fila de pines inferiores. El sistema indicó al usuario el fallo en los pines inferiores del componente.



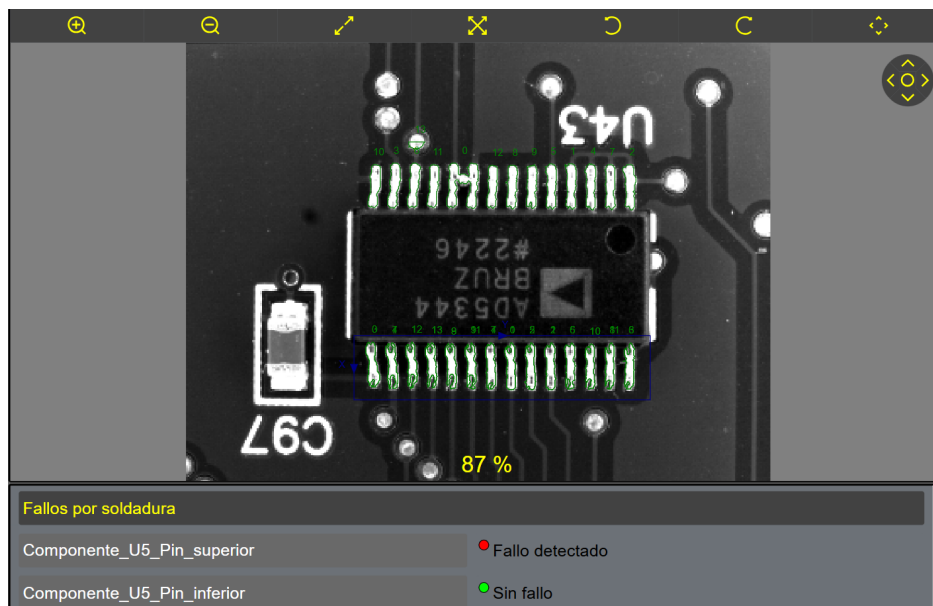
**Figura 5.16:** Inspección de componente U5. Fallo por bola de soldadura detectado. Cámara Insight 7200, programa Insight Visual Suite 5.9.0.

A partir de los resultados obtenidos, se calculó un porcentaje de error del 4.41 % (ecuación 5.15), lo que indica un porcentaje de aciertos del 95.59 %. El porcentaje de fallos se relaciona con los movimientos en la base de la PCB 98 L, ya que, a diferencia del diseño estructural, en el prototipo la sujeción no incluye tornillería. Las técnicas requieren posiciones estables para las áreas de búsqueda, evitando así falsos negativos o positivos. Cabe destacar que este tipo de fallos no estarían presentes en el producto final, por lo que no representa un resultado negativo para el sistema.

$$\text{ComponenteU5}_{\%error} = \frac{68 - 65}{68} * 100 = 4,41 \% \quad (5.15)$$

En el caso del componente U43, se aplicó la herramienta seccionada en el diseño del software para la detección de fallos por soldadura. Esta herramienta fue utilizada para evaluar tanto los pines superiores como los inferiores del componente. Se establecieron límites de área de 860 píxeles para los pines superiores y de 800 píxeles para los pines inferiores. Se evaluaron 37 PCBs, todas inspeccionadas con éxito. De estas, se reportaron 28 con fallos y 9 sin fallos. En la figura 5.17 se presenta una de las tarjetas analizadas donde se detectó un fallo de bola de soldadura entre los pines cinco y seis de la línea de pines superiores. Este fallo fue comunicado al usuario mediante un código de colores establecido, utilizando una luz roja y un mensaje que indica el problema en los pines superiores del componente U43.

Con base en los resultados, se obtuvo un 100 % de acierto, lo que sugiere que la técnica puede alcanzar altos porcentajes de acierto, incluso cuando los pines de los componentes son numerosos y están cercanos entre sí. Este éxito se relaciona con una correcta determinación de las áreas límite, lo que permite una detección precisa.



**Figura 5.17:** Inspección de componente U43. Fallo por bola de soldadura detectado. Cámara Insight 7200, programa Insight Visual Suite 5.9.0.

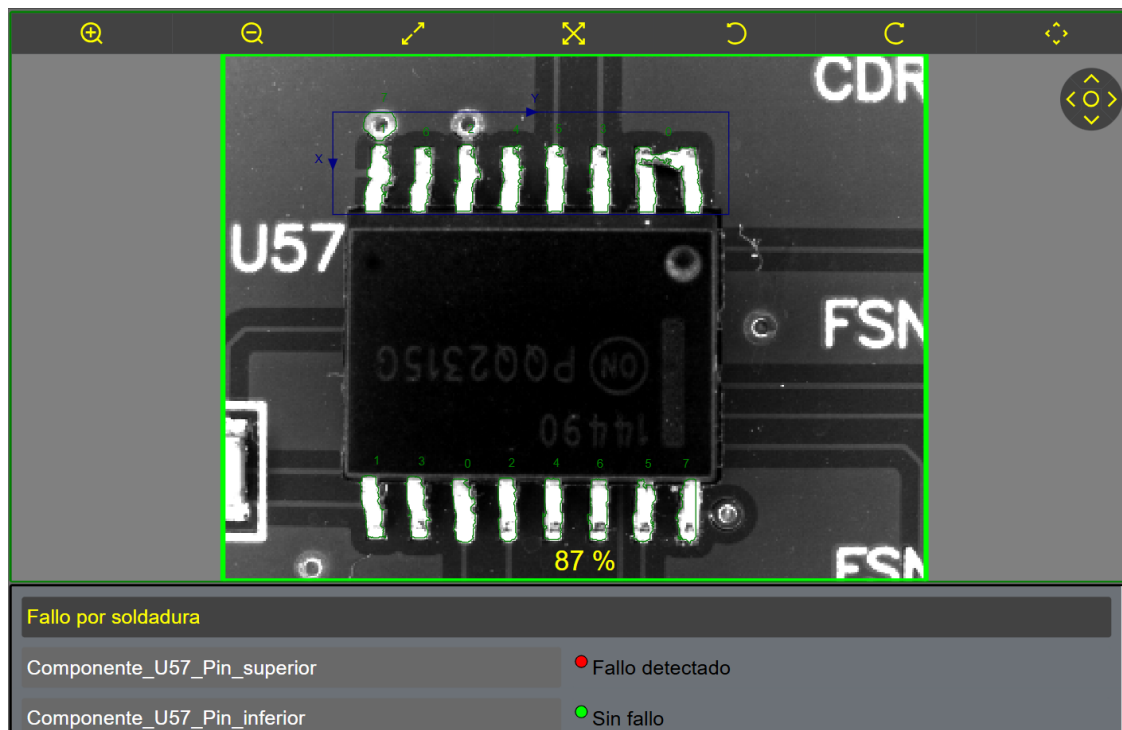
La segunda prueba del sistema se llevó a cabo para detectar fallos por soldadura causados

por puentes de soldadura. Se decidió realizar la prueba en los circuitos integrados U8 y U57. Según las entrevistas con ingenieros, estos componentes tienden a presentar este tipo de fallos. Para el componente U57, se aplicó primero la técnica de Blobs en los pines superiores e inferiores, estableciendo un límite de área de 2000 píxeles para ambos grupos de pines.

En la figura 5.19 se muestra una de las 66 inspecciones realizadas. Se logró detectar correctamente un puente en los pines superiores del componente, lo cual fue reportado al usuario mediante el código de colores diseñado (rojo para fallas y verde para zonas sin fallos) y el mensaje “Fallo detectado”. De las 66 tarjetas inspeccionadas, se obtuvo una detección correcta en 64 de ellas. Con estos resultados, se determinó que el diseño realizado presenta un porcentaje de error del 3% (ecuación 5.16) y un porcentaje de aciertos del 97%.

Una de las posibles causas de error está relacionada con la posición de la iluminación sobre la PCB. Con los cambios de tarjetas y la duración del proceso de validación, el sistema de sujeción utilizado en el prototipo puede experimentar pequeños cambios en la angulación o altura del anillo de luz. Estos cambios, aunque imperceptibles para el usuario, pueden afectar el contraste de los pines en la imagen capturada. La herramienta clasifica los píxeles de la imagen como fondo o blob; si los blobs no se diferencian correctamente del fondo debido a problemas de contraste, se pueden generar fallos de detección, como falsos negativos, al perder parte del área real.

En el producto final, la iluminación está atornillada a su soporte y a la estructura de aislamiento, ambas de aluminio. Por lo tanto, se considera poco probable que surjan problemas relacionados con esta causa.

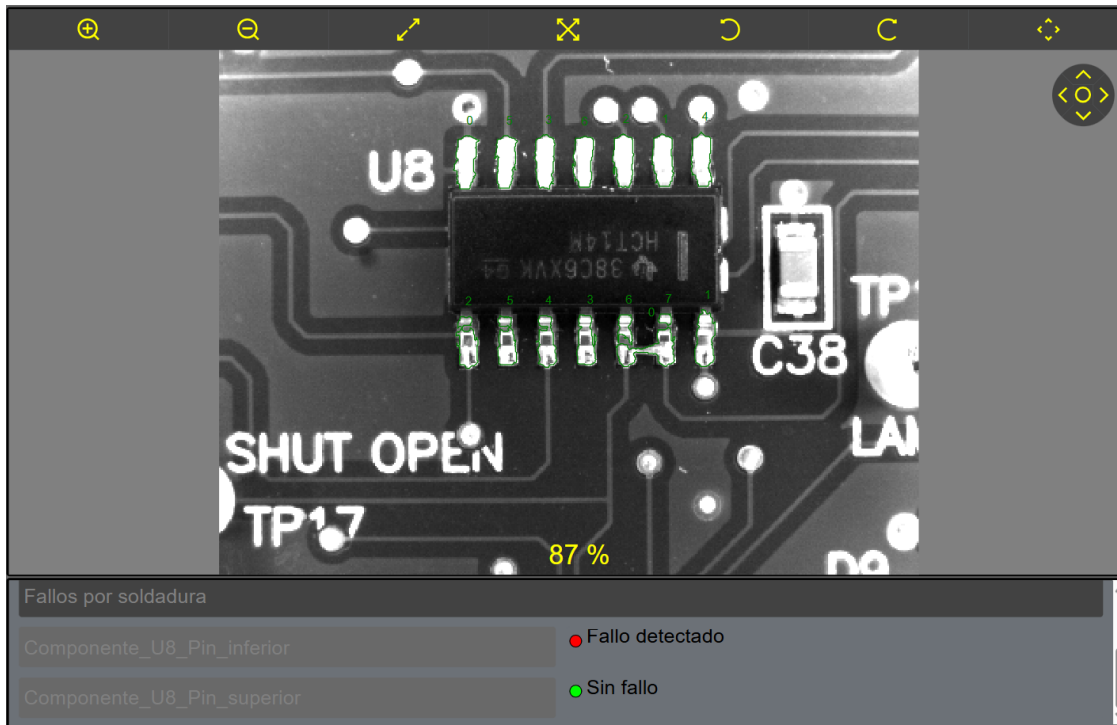


**Figura 5.18:** Inspección de componente U57. Fallo por puente de soldadura detectado. Cámara Insight 7200, programa Insight Visual Suite 5.9.0.

$$\text{ComponenteU57}_{\%error} = \frac{66 - 64}{64} * 100 = 3\% \quad (5.16)$$

De manera similar, al otro componente inspeccionado por fallas de puentes de soldadura (componente U8) se le aplicó la herramienta de blobs en los pines superiores e inferiores. Se estableció un límite de área de 2000 píxeles para los pines superiores y de 1200 píxeles para los pines inferiores. Para este componente, se evaluaron 52 PCBs, todas las cuales fueron inspeccionadas con éxito. En la figura 5.8 se muestra una de las tarjetas analizadas, en la que se detectó un fallo de puente de soldadura entre los pines cinco y seis de la fila de pines inferiores. Este hallazgo fue comunicado al usuario a través del código de colores establecido, indicando el fallo en los pines superiores del componente U8 con luz roja y un mensaje correspondiente.

Considerando los resultados, se obtuvo un 100% de aciertos. Se observó la correcta identificación de puentes, incluso aquellos que eran delgados o de forma rectangular no uniforme. Esto permitió validar la sensibilidad del diseño.



**Figura 5.19:** Inspección de componente U8. Fallo por puente de soldadura detectado. Cámara Insight 7200, programa Insight Visual Suite 5.9.0..

La última prueba consistió en la detección de pines torcidos. Para ello, se utilizó una muestra de 46 tarjetas. Se determinaron las zonas de búsqueda para los pines y se aplicó la herramienta de distancias, tal como se planteó en el diseño del software. Las distancias definidas como límite para cada uno de los pines son las siguientes:

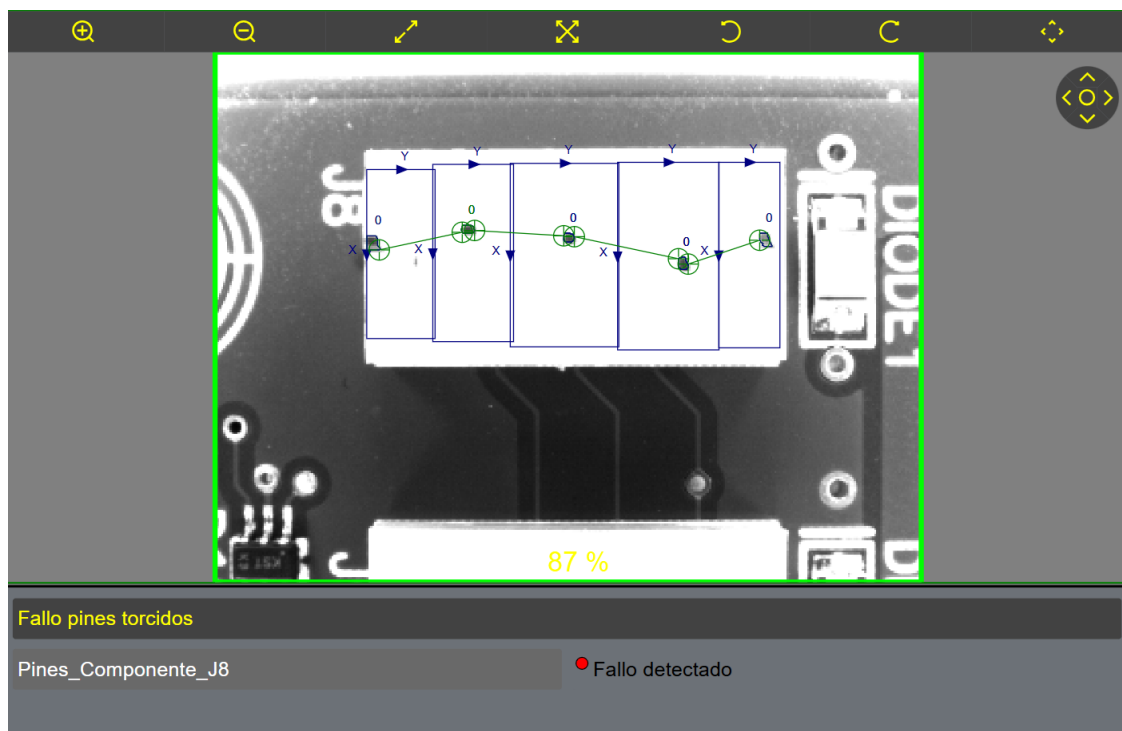
- Distancia entre pin 1 y pin 2 = 96.022 píxeles.
- Distancia entre pin 2 y pin 3 = 103 píxeles.

- Distancia entre pin 3 y pin 4 = 104.005 píxeles.
- Distancia entre pin 4 y pin 5 = 100.005 píxeles.

En la figura 5.20 se muestra una de las tarjetas analizadas, donde se informa al usuario sobre el fallo detectado. Se observa que la línea de distancias entre los pines no se encuentra recta, perdiendo su alineación en los pines 2 y 4. Se logró un acierto en 45 de las tarjetas analizadas, lo que representa un 2% de error y un 98% de aciertos en este diseño (ecuación 5.17)

Como factor de sesgo, se podrían considerar los fallos en la definición de las áreas de detección (cuadros azules en la figura 5.20). Si algún pin presenta inclinaciones que superan estas áreas, no será detectado y podría dar lugar a un error. Sin embargo, se aclara que la mayoría de los pines torcidos se encuentran dentro de las áreas de búsqueda definidas, ya que estos fallos suelen ocurrir durante el transporte, y las tarjetas están protegidas con espuma, lo que provoca solo fallos leves en los pines. Por lo tanto, no se considera que esto represente una fuente significativa de sesgo.

A partir de los resultados obtenidos en la prueba de pines, se determinó que el diseño permite la inspección desde la parte superior de los pines sin que la perspectiva afecte la detección. Esto facilita el uso de una sola cámara y lente estándar, lo que ayuda a ahorrar recursos.



**Figura 5.20:** Inspección de componente J8. Fallo por pines torcidos detectado. Cámara Insight 7200, programa Insight Visual Suite 5.9.0

$$\%error = \frac{46 - 45}{46} * 100 = 2\% \quad (5.17)$$

Posteriormente a las pruebas de validación realizadas para el software, se determinó que

el sistema diseñado para la detección de anomalías cumple con los requerimientos de construcción establecidos. Se logró una alta tasa de detección de fallas por soldadura, tanto por puentes como por bolas de material residual. Además, la técnica implementada para los pines, aunque no es la habitual según la práctica, resultó funcional y mostró un alto grado de aciertos.

En el tabla 5.3 se presenta un resumen de la cantidad de imágenes analizadas para cada componente. Se aprecia en total se capturaron 269 imágenes de las cuales 263 fueron inspeccionadas con éxito. El porcentaje de aciertos global se calculó por medio de la ecuación 5.18 dando un valor de 97.8% . Este valor indica el buen funcionamiento del sistema.

**Tabla 5.3:** Datos de PCBs para validacion.

Componentes	Unidades Inspeccionada
Componente U5	68
Componente U43	37
Componente U57	66
Componente U8	52
Componente J8	46
<b>Total</b>	<b>269</b>

$$\%aciertos = \frac{269 - 6}{269} * 100 = 97,8\% \quad (5.18)$$

El porcentaje de error es del 2.2%, un valor bajo que indica que el prototipo desarrollado permitió la correcta validación del sistema. Los fallos en la detección se relacionan con aspectos de la captura de imágenes, como los movimientos de la base de la tarjeta y ligeros movimientos en la iluminación del prototipo. Sin embargo, en el producto final, estos factores no generan problemas, ya que todo está atornillado a soportes y estructuras de aluminio.

Se concluye que el sistema diseñado cumple con los requerimientos de construcción y presenta porcentajes de acierto superiores a los actuales de los operarios. El porcentaje de aciertos de los operarios es del 85.78%, mientras que el del sistema propuesto alcanzó un 97.8% en la validación realizada con el prototipo. Esta diferencia de 12.02% destaca la eficiencia del sistema.

Por último, se midió el tiempo de inspección visual al utilizar el prototipo, registrando el tiempo desde la colocación de la PCB en la base hasta la recepción del reporte. Este tiempo tuvo un promedio de 20 segundos por tarjeta, en contraste con el tiempo actual de inspección, que es de 1 minuto y 30 segundos. A partir de estos valores, se observa una mejora del 82% en el tiempo de inspección por tarjeta. En conclusión, el sistema reduce significativamente los tiempos de inspección visual, lo que impacta positivamente en el proceso de producción de la empresa.

# Capítulo 6

## Análisis económico

En este capítulo se muestra el análisis de la viabilidad del proyecto y cuál será su impacto dentro de la empresa. Para ello, se realizó un análisis de flujo neto de efectivo, que describe los aspectos financieros necesarios para calcular métricas que respaldan la utilidad del proyecto. Adicionalmente, se evalúan aspectos no cuantificables en los que el sistema aporta beneficios al proceso productivo.

### 6.1. Análisis de flujos netos de efectivo

Para analizar los indicadores económicos del proyecto, se describe la inversión que debe realizarse en el proyecto, que incluye tanto costos directos como indirectos. Los costos directos se refieren a todos aquellos equipos, activos o servicios directamente relacionados con el desarrollo del sistema. En la tabla 6.1 se presenta un total de costos directos de \$34.388,06, que incluyen el equipo, la estructura, los soportes, así como las horas de puesta en marcha y diseño ejecutadas.

**Tabla 6.1:** Costos directos o inversión inicial para el sistema de visión desarrollado.

Ítem	Detalle	Subtotal (\$)
1	Interruptor D40A-1C2 Omron	231,5
2	Interruptor D40A-1C2 Omron	231,5
3	Sensor CQ28-10NPP-KU1 SICK	360
4	Estructura	784,25
5	Soportes	485
6	Cámara IS3808M (incluye cableado)	25.337,99
7	Óptica MORITEX, SR SERIES, 12 mm	1.149,21
8	Fuente 24V	168,37
9	Iluminación Moritex, IMC-DR, 180X153 mm, White, M12	3.022,75
10	Puesta en marcha (16 horas ingeniero)	150,24
11	Horas ingeniero (Practicante 6 meses)	2.467,49
<b>Total</b>		<b>34.388,3</b>

Asimismo, se consideraron los costos indirectos asociados al desarrollo del proyecto. El total de los costos indirectos se presenta en la tabla 6.2. En esta tabla el detalle de cálculo del mantenimiento se realizó considerando mantenimientos trimestrales que incluyen (revisión de tornillos, aceites, cableado, limpieza de lentes, la calibración de cámara y el ajuste de la iluminación, entre otros). El detalle de capacitación se contempló en una hora para los siete operarios que manejan las pruebas de las PCBs. La depreciación refleja el desgaste, la obsolescencia o el uso del equipo a lo largo de un periodo de tiempo y en este caso, este detalle toma en consideración para la obtención de su valor final las siguientes variables: el valor inicial, el valor residual y la vida útil del dispositivo. El valor residual se definió a criterio experto como un porcentaje del 80 % con respecto del valor inicial. La vida útil de cada componente del sistema se determinó según las hojas de datos y el mercado de productos de visión industrial. Finalmente, el último ítem de la tabla está relacionado con la energía, donde para el cálculo del costo asociado se contempló la potencia requerida por cada componente del sistema, las horas de uso diario (definidas en ocho) y el costo del kWh para la empresa (se utilizó el costo del kWh definido para una zona Franca en Costa Rica, el cual equivalente a \$0,19).

**Tabla 6.2:** Costos indirectos u operativos de la inversión para el proyecto en el año uno.

Ítem	Detalle	Subtotal (\$)
1	Mantenimiento (juicio experto/anual)	109,69
2	Capacitación de personal (1 hora / 7 operarios)	48,45
3	Depreciación de los equipos (anual)	396,23
4	Energía (anual)	24,711
	<b>Total</b>	<b>579,08</b>

Considerando los costos totales, el sistema de detección automática de anomalías para las PCBs tiene un costo total de \$34.967,38, lo cual se encuentra dentro del presupuesto de \$35.000 destinado por el cliente para el proyecto.

Al definir la inversión inicial, se buscó evaluar de manera cuantitativa los beneficios económicos del sistema a partir de la información disponible. Tan pronto como este proyecto sea implementado, de acuerdo con el estudio realizado en este trabajo, se obtendrá una mejora en el tiempo de pruebas por tarjeta, lo que se traducirá en una reducción de un día de trabajo en los lotes de producción. Además, se logrará una disminución en los retrabajos y en los gastos administrativos asociados. También se reducirá la cantidad de fallos y el mantenimiento de los dispositivos de pruebas para las tarjetas. En conjunto, todos estos aspectos representarán un beneficio promedio de \$3,795.01 al año.

En la tabla 6.3 se presentan los montos e indicadores del análisis de flujos netos de efectivo para el proyecto. Este análisis se realizó considerando un período de cinco años, con una tasa de costo de capital del 12 % y un impuesto sobre la renta del 0.6 %. A partir de estos parámetros, se calcularon indicadores financieros que sirven como criterios para evaluar la viabilidad de la inversión, incluyendo el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR), el retorno de inversión (ROI) y el índice de deseabilidad (ID).

**Tabla 6.3:** Flujos netos de efectivo para el proyecto

	<i>Año</i>					
	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	
Inversión inicial (\$)	34.388,3					
Costos operativos (\$)		579,08	579,08	579,08	579,08	579,08
Utilidad antes de impuestos (\$)		3795,01	4795,01	5795,01	6795,01	7795,01
Impuesto de renta (\$)		22,77	28,77	34,77	40,77	46,77
Utilidad después de impuestos (\$)		3772,24	4766,24	5760,24	6754,24	7748,24
Flujo neto efectivo (\$)	-34.388,3	3772,24	4766,24	5760,24	6754,24	7748,24
Factor de descuento		1,12	1,25	1,40	1,57	1,76
Flujo neto descontado (\$)	-34.388,3	3368,07	3799,62	4100,03	4292,44	4396,56
<b>Retorno de inversión (ROI) %</b>		<b>-90,37</b>	<b>-89,13</b>	<b>-88,27</b>	<b>-87,72</b>	<b>-87,43</b>
<b>Valor actual neto (VAN) (\$)</b>		<b>-15010,65</b>				
<b>Tasa interna de retorno (TIR)</b>		<b>-6 %</b>				
<b>Índice de deseabilidad (ID)</b>		<b>-0,571</b>				

Los datos obtenidos permitieron calcular el VAN del proyecto, que resultó ser de \$ -15010,65. Este valor indica que el proyecto no generará suficientes ganancias para justificar la inversión inicial. La TIR se situó en -6 %, lo que es inferior a la tasa de costo de capital de la empresa del 12 %. Esta TIR sugiere que la inversión no es rentable y representa una pérdida para la empresa. El ROI obtenido anualmente ha sido negativo, lo que indica que los gastos superan las ganancias, resultando en pérdidas. Además, el índice de deseabilidad obtenido es inferior a uno, lo que indica que no es un proyecto que deba ser priorizado en la empresa. En resumen, los valores obtenidos del VAN, el ROI, la TIR y el índice de deseabilidad indican que el proyecto no es viable para la empresa desde el punto de vista de los beneficios económicos directos.

## 6.2. Valor agregado no cuantificable

A pesar de que el proyecto no es rentable, es fundamental reconocer que este proyecto representará una mejora significativa en los procesos actuales de la empresa, aportando un valor agregado el cual no es cuantificable. Recordemos que, uno de los principales beneficios de este sistema será la reducción del tiempo de inspección visual de las tarjetas en un 82 %. Esto se traducirá en una disminución en los días de producción y en una mejora en los tiempos de entrega al cliente por parte de la empresa. Esto sin contar que este proyecto viene a modernizar el proceso de inspección de las PCBs realizado en la empresa y esto podría traducirse en la atracción de nuevos clientes lo cual impactará positivamente las ganancias de la compañía.

Otro beneficio no cuantificable, será la mejora del 12 % en el porcentaje de aciertos en la detección de fallos, en comparación con el porcentaje actual de los operarios. Esto permite evitar daños a los equipos de prueba que podrían detener la producción y representar un alto costo económico. Además, este proyecto contribuirá a reducir las probabilidades de

devoluciones por parte de los clientes, lo que mejorará su confianza hacia la empresa.

Es importante considerar que el margen de ganancia de la empresa por las PCBs 98 L es del 40.2% anual, lo que se traduce en un promedio de ganancias de \$233,018.80 al año. Estos datos resaltan la importancia de optimizar el proceso de producción de las tarjetas, ya que su ingreso es representativo para la empresa.

Por otro lado, es importante destacar también los beneficios ergonómicos que tendrá la implementación de este dispositivo para los empleados de la empresa. El diseño de este sistema no solo priorizó la seguridad laboral de los operarios sino que también tiene como consecuencia que, al eliminar la inspección visual de las tareas de los operarios, esto contribuirá en reducir el desgaste visual que puede sufrir estos, y a su vez, esto se traducirá en una disminución de la fatiga y un eventual aumento de la productividad en sus labores.

En conclusión, aunque el análisis económico realizado arrojó valores negativos para el VAN, la TIR, el ROI y el ID, el proyecto ofrece numerosos beneficios no cuantificables para la empresa. Estos incluyen mejoras en los tiempos de entrega, aumento en los porcentajes de aciertos, reducción de daños en equipos, mayor confianza por parte del cliente, cuidado de la salud de los operarios y la incorporación de tecnología en productos que generan altas ganancias. Todo lo anterior es relevante al considerar la inversión en un proyecto destinado a mejorar la producción.

# Capítulo 7

## Conclusiones y Recomendaciones

En el presente capítulo se presentan las principales conclusiones que se obtuvieron a lo largo del desarrollo del proyecto. Así mismo, también se enlistan recomendaciones para las diferentes oportunidades de mejora en la futura continuación de este proyecto.

### 7.1. Conclusiones

Se realizó un diagnóstico del proceso actual para la detección de anomalías en las PCBs de la empresa Gener8, lo que permitió definir el problema y determinar los factores necesarios para desarrollar un sistema que satisficiera al cliente. Se identificaron las necesidades y requerimientos específicos.

A través de la aplicación de la metodología de ingeniería, se seleccionaron los elementos de hardware adecuados para la solución. La cámara, la iluminación, la lente, los sensores y la estructura elegidos permitieron la captura de imágenes cada 20 segundos, mejorando los tiempos de inspección en un 82 % por tarjeta.

El sistema de montaje y toma de imágenes cumplió con los requerimientos de diseño, proporcionando soporte a todos los elementos de hardware y asegurando factores de seguridad en sus piezas críticas de 165 y 332, lo que garantiza la estabilidad de la estructura. Además, el volumen del sistema cumple con el requisito de ser inferior a  $0.096 \text{ m}^3$ .

Las herramientas de visión para la detección y medición de blobs seleccionadas para el sistema de detección de anomalías cumplieron con el 100 % de los requisitos de construcción. Estas herramientas permitieron extraer las partes de interés y realizar cálculos de áreas y distancias. A partir de estos cálculos, se establecieron límites de área para las fallas de soldadura y distancias límite para los pines. La interfaz HMI creada permitió informar al usuario cuando estos límites fueron superados, indicando un fallo en la PCB inspeccionada.

El prototipo desarrollado permitió llevar a cabo la validación del sistema, y los resultados obtenidos mostraron un porcentaje de aciertos superior al 95 % en todas las pruebas realizadas, con un porcentaje global del 97.8 %. Este valor supera en más de cinco puntos porcentuales

el porcentaje de aciertos de los operarios, lo que confirma positivamente la funcionalidad del sistema.

Por último, el análisis económico del proyecto indica que no es rentable desde un punto de vista financiero; sin embargo, sus beneficios no cuantificables son significativos.

## 7.2. Recomendaciones

- Se sugiere realizar ajustes a la estructura diseñada que permitan movimientos verticales, con el objetivo de cambiar el campo de visión sin necesidad de montar otra óptica o capturar áreas innecesarias.
- Para identificar otras anomalías en la PCB, como soldaduras flojas en los componentes, se recomienda el uso de otra cámara en un ángulo lateral. Esto permitiría realizar un análisis visual más completo de las tarjetas, ya que desde una única cámara superior no es posible detectar fallos en las uniones o cambios en la altura de los componentes.
- Al haber desarrollado el proyecto para la tarjeta de mayores dimensiones de la empresa, es posible estandarizarlo para las demás PCBs, ya que la resolución mínima del dispositivo es muy alta. Para ello, se trabaja únicamente con la zona de la imagen capturada que contiene la PCB, desestimando el resto del campo de visión en el análisis.

# Bibliografía

- [1] J. Barrera, “Fundamentos de placas de circuito impreso,” 2023. [En línea]. Disponible: <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa4/article/view/11013/10422>
- [2] IPC, “Aceptabilidad de ensambles electrónicos,” 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.ipc.org/TOC/IPC-A-610G.pdf>
- [3] D. Sanín, “Sistema de detección de defectos en placas electrónicas pcbs,” 2021. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.uniajc.edu.co/server/api/core/bitstreams/742a43a5-0026-4d6a-9bb0-1ab6629c6ee3/content>
- [4] KEYENCE, “Vision system with built-in ai new vs series,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.keyence.com/mykeyence/?ptn=001>
- [5] Keyence, “Sistema de visión de fácil programación serie cv-x,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.keyence.com.mx/products/vision/vision-sys/cv-x100/>
- [6] SERVISOUD, “Sistema de visión para soldaduras, servicam,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.directindustry.es/prod/servisoud/product-244064-2666846.html>
- [7] USTER, “Evs fabriq vision the fabric quality assurance system,” 2024. [En línea]. Disponible: [https://www.uster.com/fileadmin/user\\_upload/Downloads/1\\_Products/1.5\\_Non-Woven/EVS\\_Fabriq\\_Vision\\_N/Uster\\_EVS\\_Fabriq\\_Vision\\_N\\_techdata\\_web\\_en\\_23.pdf](https://www.uster.com/fileadmin/user_upload/Downloads/1_Products/1.5_Non-Woven/EVS_Fabriq_Vision_N/Uster_EVS_Fabriq_Vision_N_techdata_web_en_23.pdf)
- [8] Cognex, “What is a 3d machine vision camera?” 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.cognex.com/products/machine-vision/3d-machine-vision-systems>
- [9] Cognex, “In-sight® explorer help.blobs.” 2020.
- [10] Cognex, “In-sight® explorer help. vision tools. patternmatch,” 2020.
- [11] Cognex, “In-sight® explorer help. vision tools.histogram,” 2020.
- [12] Cognex, “In-sight® explorer help.edge.” 2020.
- [13] Cognex, “In-sight® explorer help. vision tools.measurefunctions,” 2020.
- [14] K. Corporation, “Vision system peripheral equipment,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.keyence.eu/ss/products/vision/peripheral/ca-1/>

- [15] Cognex, “In-sight® 3800 series reference manual,” 2024. [En línea]. Disponible: [https://support.cognex.com/docs/is-usp\\_2421/EN/IS3800\\_Reference\\_Manual.pdf](https://support.cognex.com/docs/is-usp_2421/EN/IS3800_Reference_Manual.pdf)
- [16] Siemens, “6es7516-3ap03-0ab0,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7516-3AP03-0AB0>
- [17] Siemens, “Panel pc,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/10007484?tree=CatalogTree>
- [18] S. B. y M. Tehranipour, “Hardware security. printed circuit board (pcb): Design and test,” 2019. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812477-2.00009-5>
- [19] Cognex, “Addendum sheet: In-sight® 7000 series vision system installation manual,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.cognex.com/support/downloads/ns/1/11/35/IS7000-Color.pdf>
- [20] C. Corporation, “In-sight 3800 series all-in-one vision system meets all your vision needs,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.cognex.com/products/machine-vision/2d-machine-vision-systems/in-sight-3800>
- [21] Gener8, “About.welcome to gener8. an engineering and product design firm based in sunny san jose, california.” 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.gener8.net/about/>
- [22] H. NÚÑEZ, “Fundamentos de placas de circuito impreso,” 2021. [En línea]. Disponible: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20029>
- [23] L. T. C. Valderrama, “Análisis y comparación de metodologías para desarrollar prueba de concepto de un sistema de soldadura por ola para el proceso de soldadura de componentes de orificio pasante para pcb,” 2022. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/50449f06-3724-484f-bc3b-4ad28b3b7b35/content>
- [24] IPC, “Ipc-1601a printed board handling and storage guidelines,” 2010. [En línea]. Disponible: <https://www.ipc.org/TOC/IPC-1601A.pdf>
- [25] A. C. y E. Martinez, “Vision por computadora: identificación, clasificación y seguimiento de objetos.” 2014. [En línea]. Disponible: [https://web.archive.org/web/20180421075344id\\_/http://une.edu.py:82/fpunescientific/index.php/fpunescientific/article/viewFile/172/170](https://web.archive.org/web/20180421075344id_/http://une.edu.py:82/fpunescientific/index.php/fpunescientific/article/viewFile/172/170)
- [26] J. Campeche, “Diseno e implementacion de un sistema mecatronico para la identificacion de dispositivos en tarjetas pcb usando vision por computadora,” 2013. [En línea]. Disponible: [https://www.academia.edu/36131624/Diseno\\_y\\_Desarrollo\\_de\\_Productos\\_Karl\\_T\\_Ulrich\\_5t\\_Edicion](https://www.academia.edu/36131624/Diseno_y_Desarrollo_de_Productos_Karl_T_Ulrich_5t_Edicion)
- [27] J. V. S. y A Moreno Diaz y A Sanchez Calle y J. L. Sanchez Marin, *Vision por Computador*. Espana: Universidad Rey Juan Carlos, 2 ed, 2003.

- [28] E. Alegre, G. Pajares, and A. Escalera”, *Conceptos y Metodos en Vision por Computador*. Espana: CEA Vision, 2016.
- [29] A. Gonzalales, F. Pison, V. Perma, and F. Alba, *Tecnicas y algoritmos basicos de visi´on artificial*. Madrid: EDMANS, 2006.
- [30] Emerson, “Calcular la resoluci3n del sensor de la c3mara y la longitud focal del lente,” 2020. [En l´nea]. Disponible: <https://www.ni.com/es/support/documentation/supplemental/18/calculating-camera-sensor-resolution-and-lens-focal-length.html?srsltid=AfmBOorlooAPzILhsuguGT-B5OtSB0Dlv044a76qL4J8zElyPeXoJC13>
- [31] Canon, “Explicaci3n de los sensores de imagen,” 2024. [En l´nea]. Disponible: <https://www.canon.es/pro/infobank/image-sensors-explained/>
- [32] C. G. Montero, “Dimensionamiento de piezas usando el sistema de vision de la celda de manufactura flexible en la facultad de inegnieria mecanica,” 2007. [En l´nea]. Disponible: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/0e546d63-1021-4957-b19b-34f6cea269ea/content>
- [33] L.A.Lopez, *DiseNo de modulo de vision para celda de manufactura flexible*. Master’s thesis, CIATEQ, Aguas Caliente, Mexico, 2014.
- [34] Cognex, “¿cu3les son los principales tipos de sistemas de visi3n?” 2024. [En l´nea]. Disponible: <https://www.cognex.com/es-mx/what-is/machine-vision/types-of-machine-vision-systems>
- [35] Cognex, “In-sight® explorer help. vision tools.” 2020.
- [36] Cognex, “In-sight® explorer help.flawdetection.” 2020.
- [37] Cognex, “In-sight® explorer help. vision tools.inspectedge,” 2020.
- [38] K. T. U. y S. D. Eppinger, “Dise˜no y desarrollo de productos,” 2013. [En l´nea]. Disponible: [https://www.academia.edu/36131624/Diseno\\_y\\_Desarrollo\\_de\\_Productos\\_Karl\\_T\\_Ulrich\\_5t\\_Edicion](https://www.academia.edu/36131624/Diseno_y_Desarrollo_de_Productos_Karl_T_Ulrich_5t_Edicion)
- [39] F. y I.Barrantes, “Daj-ae-011-13,” 2013. [En l´nea]. Disponible: <https://www.mtss.go.cr/elministerio/estructura/direccion-asuntos-juridicos/pronunciamientos/daj-ae-011-13%20Jose%20Monge%20Salud%20Ocupacional.pdf>
- [40] I. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, “Seguridad en el trabajo,” 2011. [En l´nea]. Disponible: <https://www.insst.es/documents/94886/599872/Seguridad+en+el+trabajo/e34d1558-fed9-4830-a8e3-b0678c433bb1>
- [41] C. Corporation, “Catalog lighting,” 2024. [En l´nea]. Disponible: <https://www.cognex.com/products/machine-vision/vision-software/vision-accessories/lighting>
- [42] M. y E.Blanco, “Resistencia de materiales,” 2015. [En l´nea]. Disponible: <https://cervera.rmee.upc.edu/libros/Resistencia%20de%20Materiales.pdf>

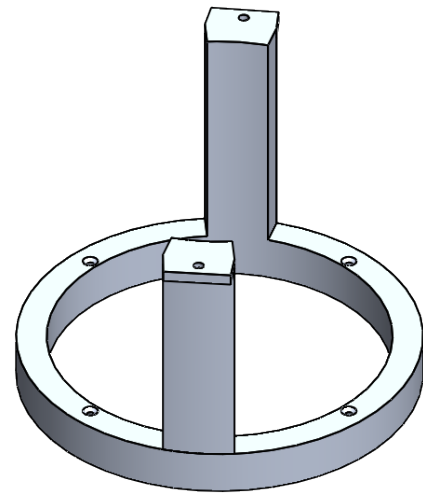
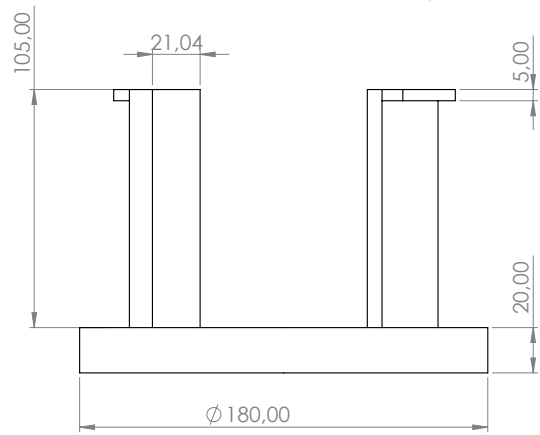
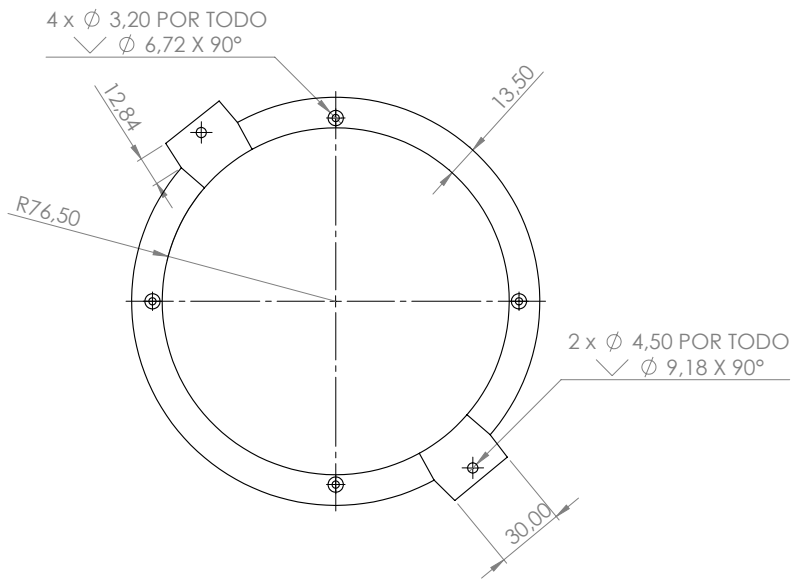
- [43] C. Corporation, “In-sight 9912 vision system,” 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.cognex.com/products/machine-vision/2d-machine-vision-systems/in-sight-9000-series>
- [44] G. y H.Toro, “Protocolos de comunicaci3n industrial,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.ecci.edu.co/bitstream/handle/001/1874/Informe%20de%20seminario.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [45] KEYENCE, “Vision sensor with built-in ai, iv3 serie,” 2024. [En línea]. Disponible: [https://www.keyence.com/mykeyence/?ptn=001&deqwas\\_inflow=QGRzcDUwOlk4S0I5YIMzQ1VxTXYwb2VtTE81alE6aXRlbV92aWV3OjpXU18xNTcxNjE6MVE&ad\\_local=recoassetcamyk](https://www.keyence.com/mykeyence/?ptn=001&deqwas_inflow=QGRzcDUwOlk4S0I5YIMzQ1VxTXYwb2VtTE81alE6aXRlbV92aWV3OjpXU18xNTcxNjE6MVE&ad_local=recoassetcamyk)
- [46] Delta, “Delta machine vision system dmv2000 series,” 2024. [En línea]. Disponible: [https://www.forgehitech.com/industrial-automation/wp-content/uploads/2018/06/DELTA-Machine-Vision-System-DMV2000-Series\\_EN\\_20160623.pdf](https://www.forgehitech.com/industrial-automation/wp-content/uploads/2018/06/DELTA-Machine-Vision-System-DMV2000-Series_EN_20160623.pdf)
- [47] OMRON, “Pc vision system fj series camera software vision package,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://assets.omron.com/m/76463f59570ab889/original/FJ-PC-Vision-system-Datasheet.pdf>
- [48] SICK, “V2d8512p-1mcxxxaf0sxxxx inspector85x,” 2024. [En línea]. Disponible: [https://cdn.sick.com/media/pdf/9/99/599/dataSheet\\_V2D8512P-1MCXXXAF0SXXXX\\_1139003\\_en.pdf](https://cdn.sick.com/media/pdf/9/99/599/dataSheet_V2D8512P-1MCXXXAF0SXXXX_1139003_en.pdf)
- [49] DirectIndustry, “¿cómo elegir un sensor de proximidad?” 2024. [En línea]. Disponible: <https://guide.directindustry.com/es/que-sensor-de-proximidad-elegir/>
- [50] X. U. sensor, “Telemecanique ultrasonic sensors xx,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://telemecaniquesensors.com/global/en/product/reference/XXW54P3APL01M12#documents>
- [51] Keyence, “Sensores ultras3nicos digitales de alta potencia serie fw,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.keyence.com.mx/products/sensor/positioning/fw/>
- [52] Eaton, “Datasheet.e53kal30t110e,” 2024. [En línea]. Disponible: [https://datasheet.eaton.com/Eaton-134774-E53KAL30T110E-en\\_GB.pdf?model=134774&locale=en\\_GB&type=pdf](https://datasheet.eaton.com/Eaton-134774-E53KAL30T110E-en_GB.pdf?model=134774&locale=en_GB&type=pdf)
- [53] SICK, “Sensores de proximidad capacitivos,” 2024. [En línea]. Disponible: [https://cdn.sick.com/media/pdf/3/63/263/dataSheet\\_CM30-25NPP-EC1\\_6058157\\_es.pdf](https://cdn.sick.com/media/pdf/3/63/263/dataSheet_CM30-25NPP-EC1_6058157_es.pdf)
- [54] SICK, “Capacitive proximity sensors cq28-10npp-kw1,” 2024. [En línea]. Disponible: [https://cdn.sick.com/media/pdf/3/63/263/dataSheet\\_CQ28-10NPP-KW1\\_6030132\\_en.pdf](https://cdn.sick.com/media/pdf/3/63/263/dataSheet_CQ28-10NPP-KW1_6030132_en.pdf)
- [55] Colsen, “Interruptores de seguridad sin contacto,” 2024. [En línea]. Disponible: [http://www.colsein.com.co/producto/482/interruptor\\_seguridad\\_RE2](http://www.colsein.com.co/producto/482/interruptor_seguridad_RE2)

- [56] SEMAI, “Todo lo que necesitas saber sobre el perfil bosh en la industria,” 2022. [En línea]. Disponible: <https://semai.com/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-el-perfil-bosch-en-la-industria/>
- [57] Coppermetal, “Aluminio 6063: características y aplicaciones,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.coppermetal.com.br/es/blog/aluminio-6063-caracteristicas-y-aplicaciones/>
- [58] I. I. GmbH, “Paneles,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.item24.com/es-mx/paneles>
- [59] I. I. GmbH, “Uniones de paneles,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.item24.com/es-mx/paneles/uniones-de-paneles>
- [60] I. I. GmbH, “Tecnología de perfiles,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.item24.com/es-mx/tecnologia-de-perfiles>
- [61] K. M. Corporation, “Comparación entre el aluminio 6061 y el 6063,” 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.item24.com/es-mx/paneles>
- [62] Cognex, “In-sight vision suite software,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://support.cognex.com/en/downloads/detail/in-sight/5225/1033>
- [63] A. Martínez, “Ventajas de los dispositivos ethernet en el mundo industrial,” 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.northwindts.com/es/advantages-ethernet-devices-industrial-world/>
- [64] R. Budynas and J. Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. 9° Ed., McGraw-Hill, México, 2012.
- [65] cognex, “In-sight 7000 features,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.cognex.com/products/machine-vision/2d-machine-vision-systems/in-sight-7000-series>
- [66] M. Mora, “Fórmulas y tablas estadísticas,” 2008. [En línea]. Disponible: <https://gastonperez.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/10/tablacon-hipergeometrica.pdf>



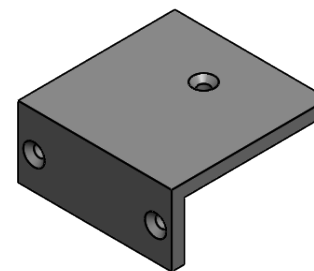
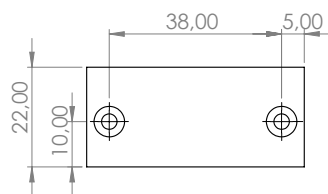
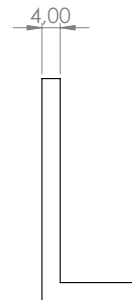
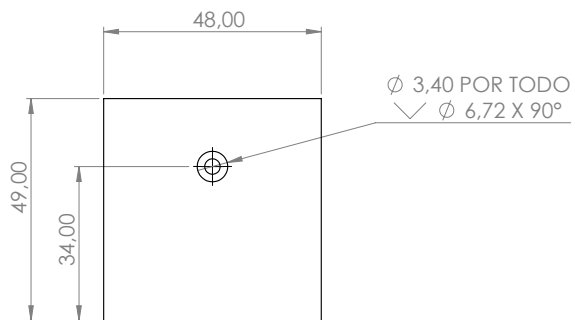
# Apéndice A

## Planos de la Estructura



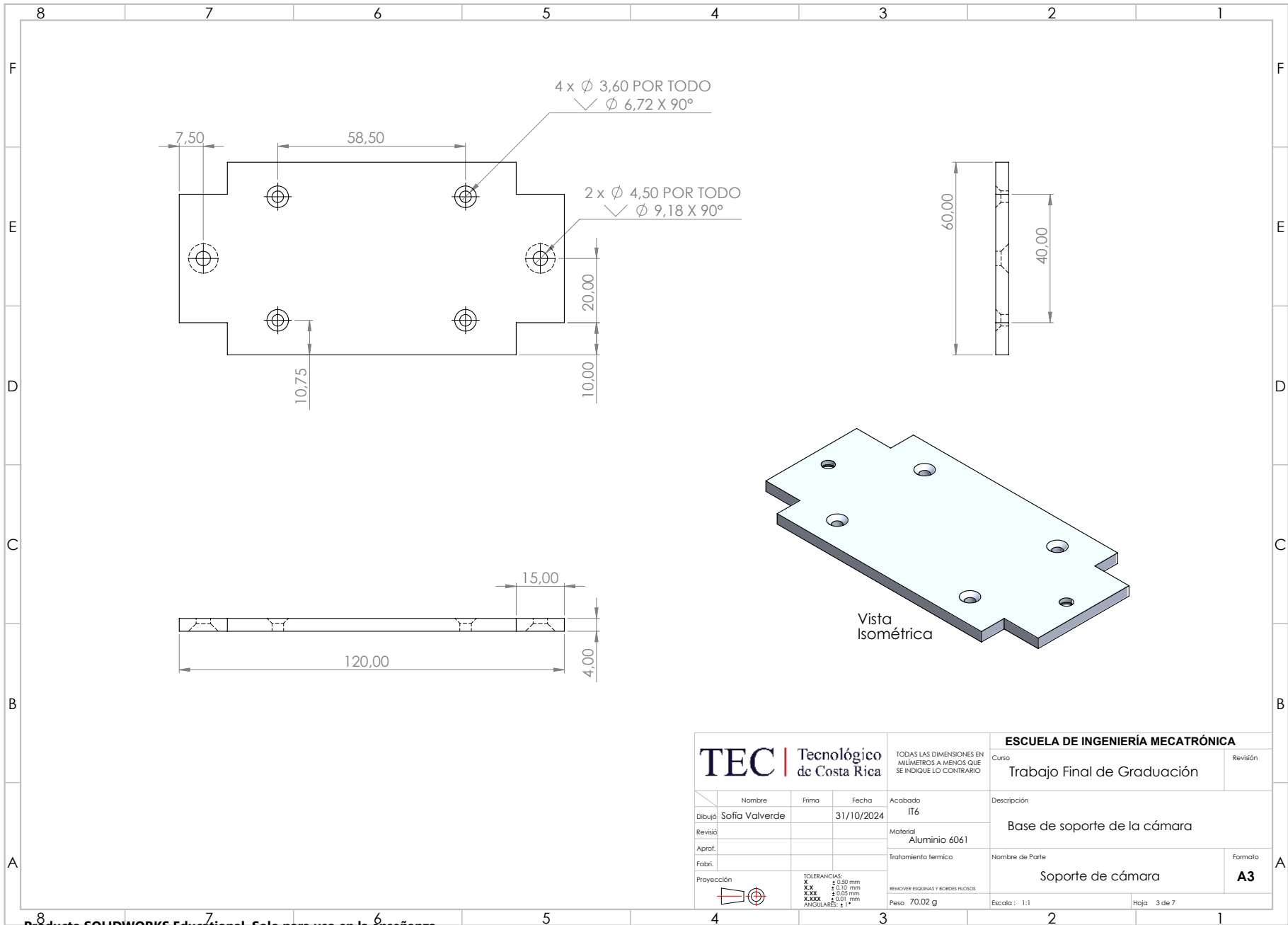
Vista Isométrica

<b>TEC</b>   Tecnológico de Costa Rica		TODAS LAS DIMENSIONES EN MILÍMETROS A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO		<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>	
Nombre		Firma		Curso	
Fecha		Acabado		Revisión	
Dibujó: Sofia Valverde		31/10/2024		Trabajo Final de Graduación	
Revisió		IT6		Descripción	
Aprof.		Material		Soporte para iluminación tipo anillo	
Fabr.		Aluminio 6061		Nombre de Parte	
Proyección		Tratamiento termico		Soporte de iluminación	
		TOLERANCIAS: X ± 0,50 mm XX ± 0,10 mm XXX ± 0,05 mm XXXX ± 0,01 mm ANGULARES: ± 1°		Formato	
		SEMOVER ESQUINAS Y BORDES FILIGES		A3	
		Peso 614,14 gramos		Escala: 1:2	
				Hoja 1 de 7	





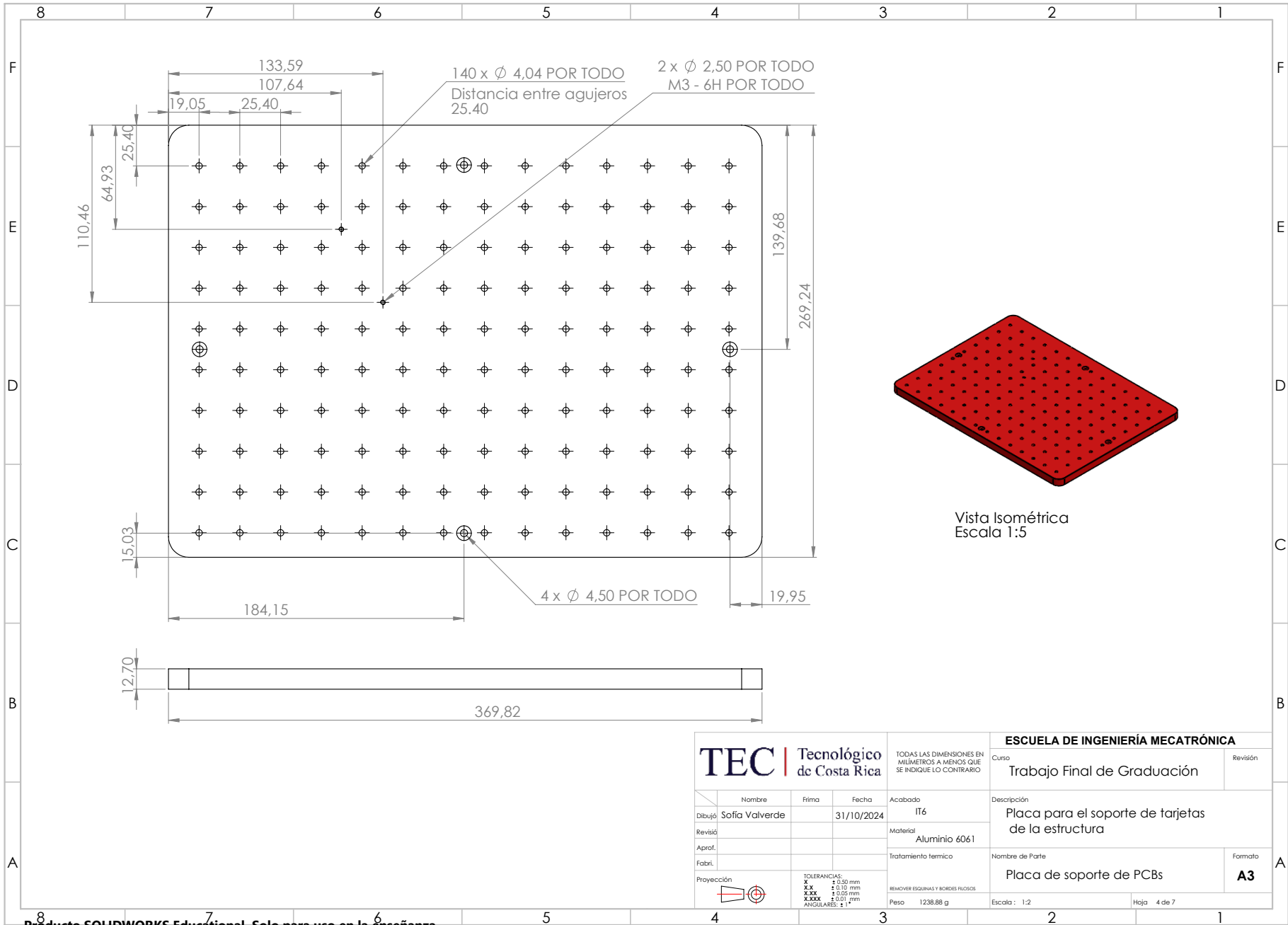
Vista Isométrica

<b>TEC</b>   Tecnológico de Costa Rica			TODAS LAS DIMENSIONES EN MILÍMETROS A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO		<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>	
					Curso Trabajo Final de Graduación	Revisión
Nombre Sofía Valverde	Firma	Fecha 31/10/2024	Acabado IT6	Descripción Soporte para interruptores de no contacto de puertas		
Revisió			Material Aluminio 6061			
Apro.			Tratamiento termico	Nombre de Parte Soporte de interruptor	Formato <b>A3</b>	
Fabr.			TOLERANCIAS: X ± 0,50 mm XX ± 0,10 mm XXX ± 0,05 mm XXXX ± 0,01 mm ANGULARES: ± 1°	REMOVER ESQUINAS Y BORDES FILSOS		
Proyección			Peso 32,28 g	Escala : 1:2	Hoja 2 de 7	

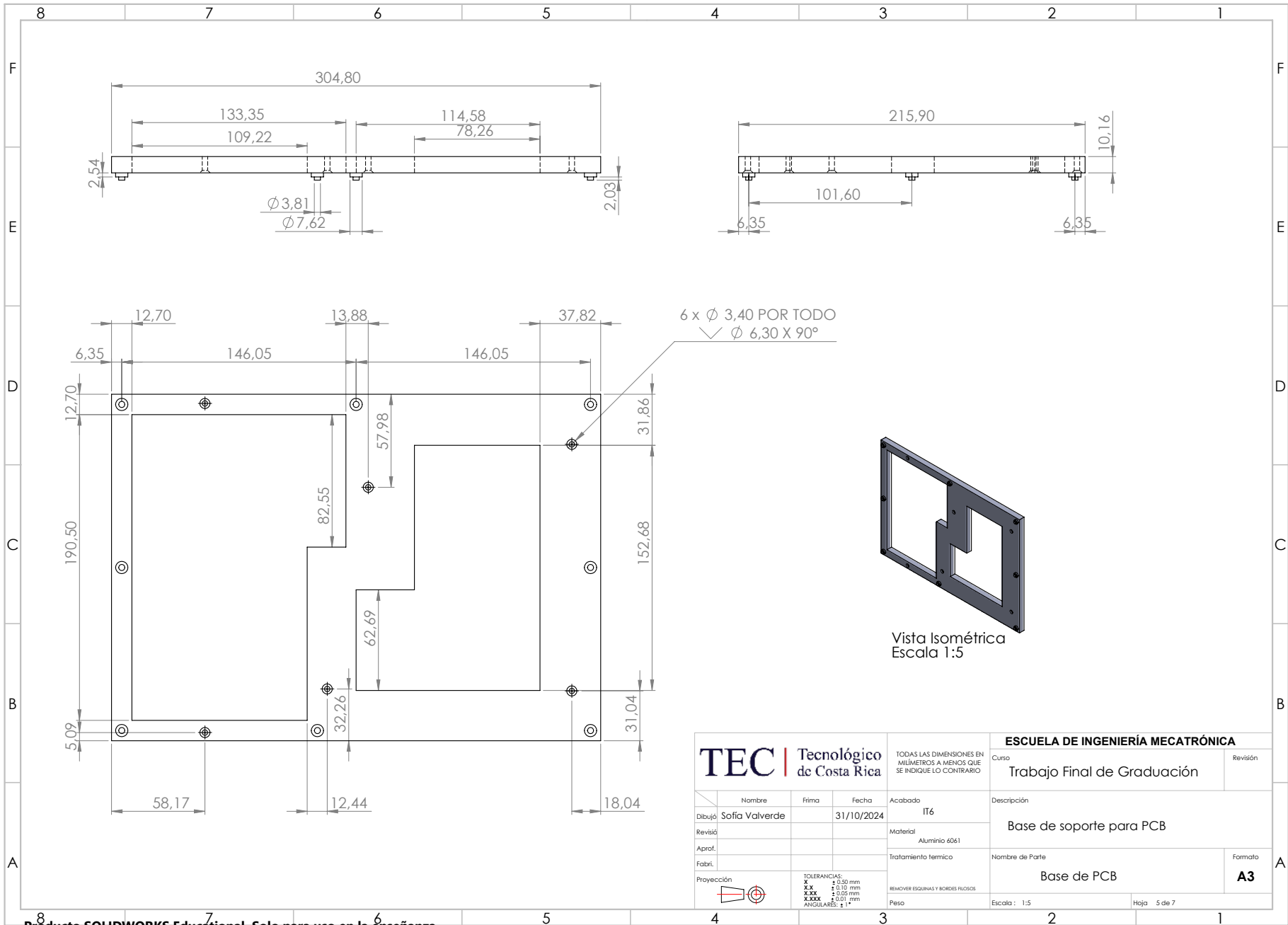


Vista Isométrica

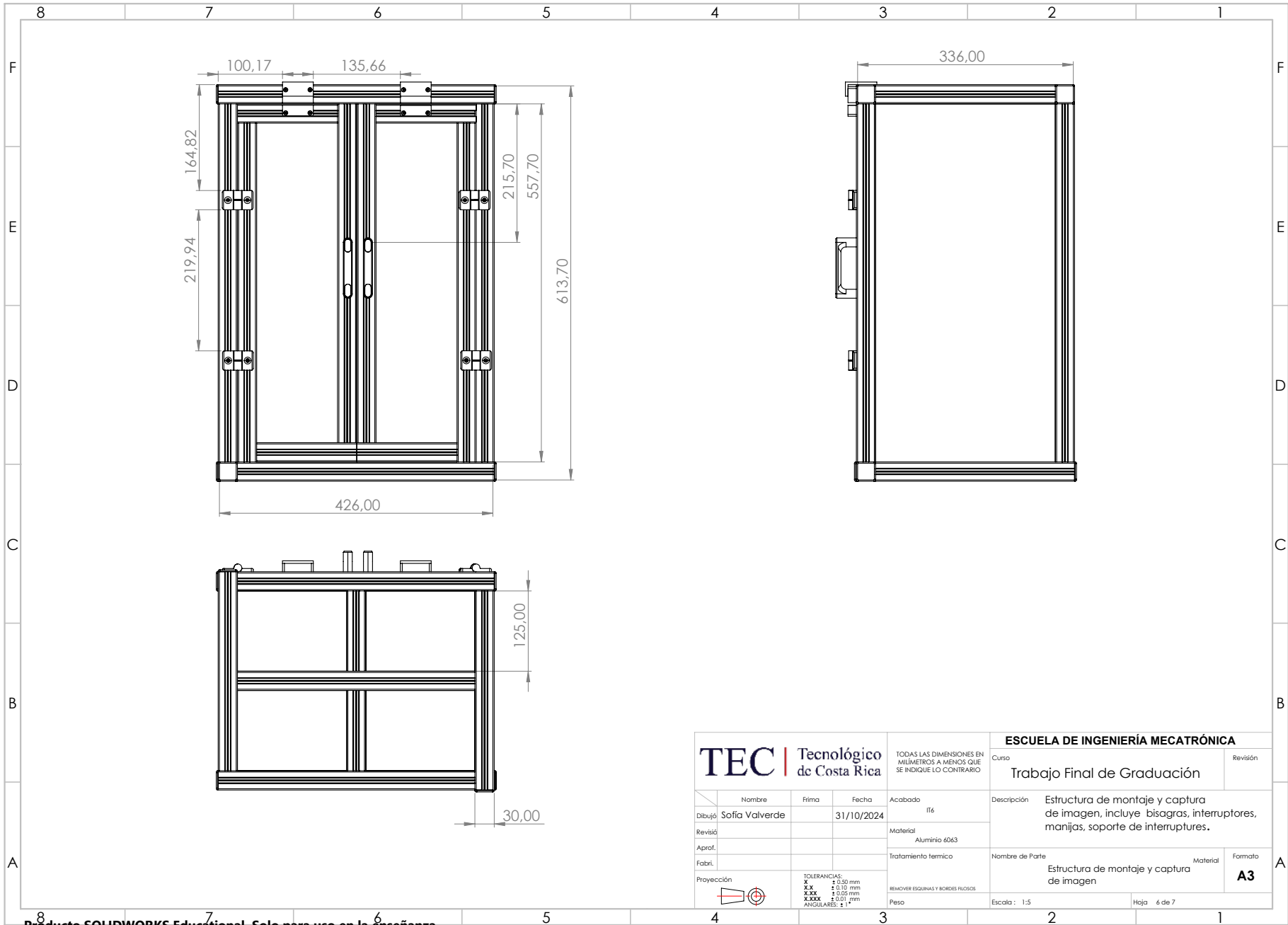
 <b>Tecnológico de Costa Rica</b>			TODAS LAS DIMENSIONES EN MILÍMETROS A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO		<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>	
Nombre: Firma: Fecha:			Acabado: IT6		Curso: Trabajo Final de Graduación	
Dibujó: Sofia Valverde			Material: Aluminio 6061		Descripción: Base de soporte de la cámara	
Revisió: Aprob.: Fabrí:			Tratamiento térmico:		Nombre de Parte: Soporte de cámara	
Proyección: 			TOLERANCIAS: X ± 0.50 mm XX ± 0.10 mm XXX ± 0.05 mm XXXX ± 0.01 mm ANGULARES: ± 1°		Formato: <b>A3</b>	
			SEMOVAR ESQUINAS Y BORDOS REDONDOS		Escala: 1:1	
			Peso: 70.02 g		Hoja: 3 de 7	



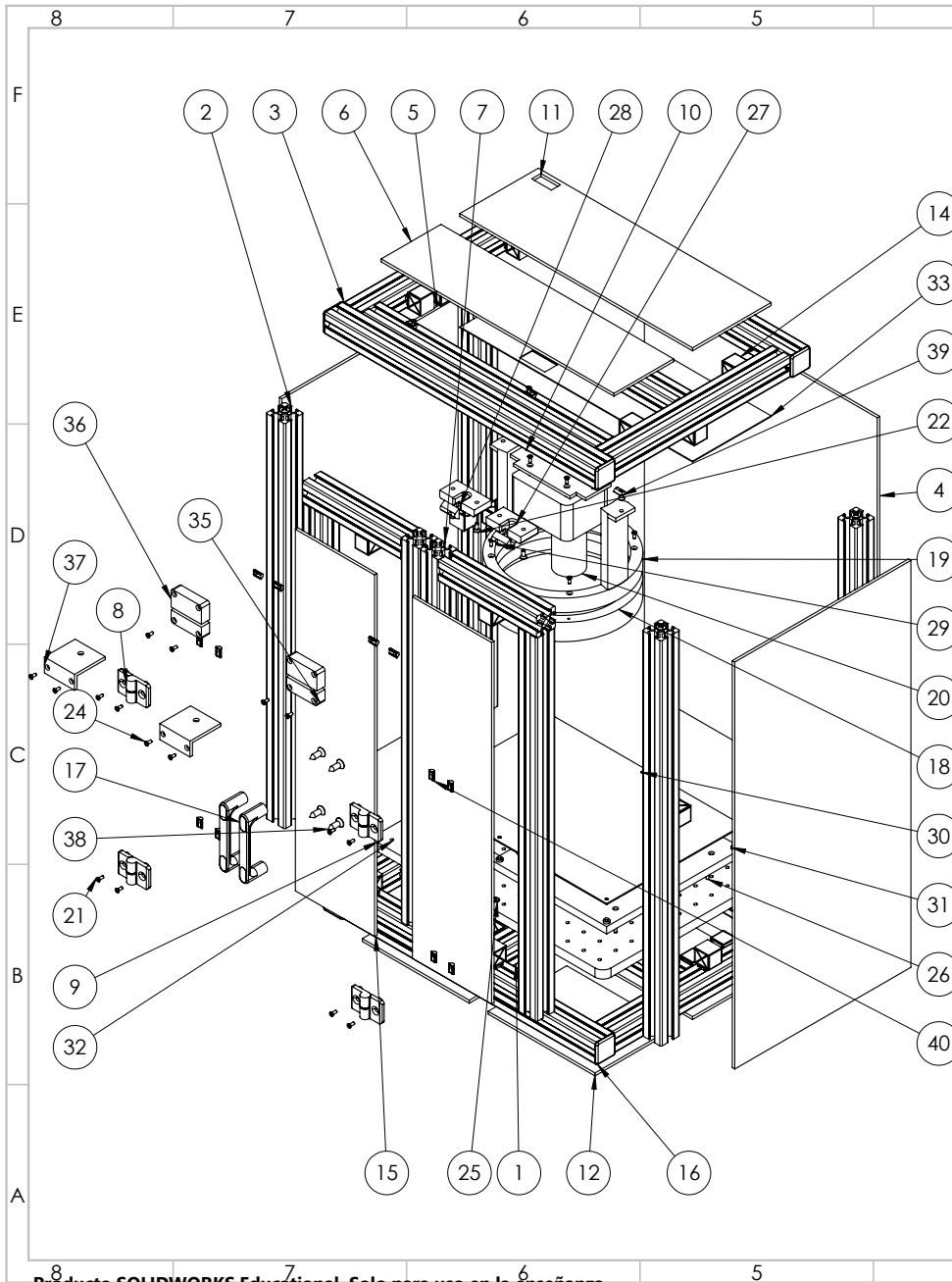
<b>TEC</b>   Tecnológico de Costa Rica			TODAS LAS DIMENSIONES EN MILÍMETROS A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO		<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>	
Curso			Trabajo Final de Graduación		Revisión	
Nombre			Fecha		Descripción	
Dibujó Sofía Valverde			31/10/2024		Placa para el soporte de tarjetas de la estructura	
Revisió			Acabado		Nombre de Parte	
Aprof.			IT6		Placa de soporte de PCBs	
Fabri.			Material		Formato	
Proyección			Aluminio 6061		A3	
TOLERANCIAS:			Tratamiento termico		Escala : 1:2	
X ± 0.50 mm			REMOVER ESQUINAS Y BORDOS FILSOS		Hoja 4 de 7	
XX ± 0.10 mm			Peso 1238.88 g			
XXX ± 0.05 mm						
XXXX ± 0.01 mm						
ANGULARES: ± 1°						



<b>TEC</b>   Tecnológico de Costa Rica		TODAS LAS DIMENSIONES EN MILÍMETROS A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO		<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>	
Nombre		Fecha		Curso	
Dibujó Sofia Valverde		31/10/2024		Trabajo Final de Graduación	
Revisó		Acabado		Descripción	
Aprof.		IT6		Base de soporte para PCB	
Fabr.		Material		Nombre de Parte	
Proyección		Aluminio 6061		Base de PCB	
TOLERANCIAS:		Tratamiento térmico		Formato	
X ± 0,50 mm		REMOVER ESQUINAS Y BORDES RÍJIDOS		A3	
XX ± 0,10 mm		Peso		Escala: 1:5	
XXX ± 0,05 mm		Escala: 1:5		Hoja 5 de 7	
XXX ± 0,01 mm					
ANGULARES: ± 1°					



<b>TEC</b>   Tecnológico de Costa Rica		TODAS LAS DIMENSIONES EN MILÍMETROS A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO		<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>	
Curso		Trabajo Final de Graduación		Revisión	
Nombre	Frma	Fecha	Acabado	Descripción	Estructura de montaje y captura de imagen, incluye bisagras, interruptores, manijas, soporte de interruptores.
Dibujó	Sofía Valverde	31/10/2024	IT6		
Revisió			Materia	Aluminio 6063	
Aprof.			Tratamiento termico	Nombre de Parte	Estructura de montaje y captura de imagen
Fabri.				Peso	Material
Proyección			<b>TOLERANCIAS:</b> X ± 0,50 mm XX ± 0,10 mm XXX ± 0,05 mm XXXX ± 0,01 mm ANGULARES: ± 1°		Formato
				Escala : 1:5	A3
				Hoja 6 de 7	

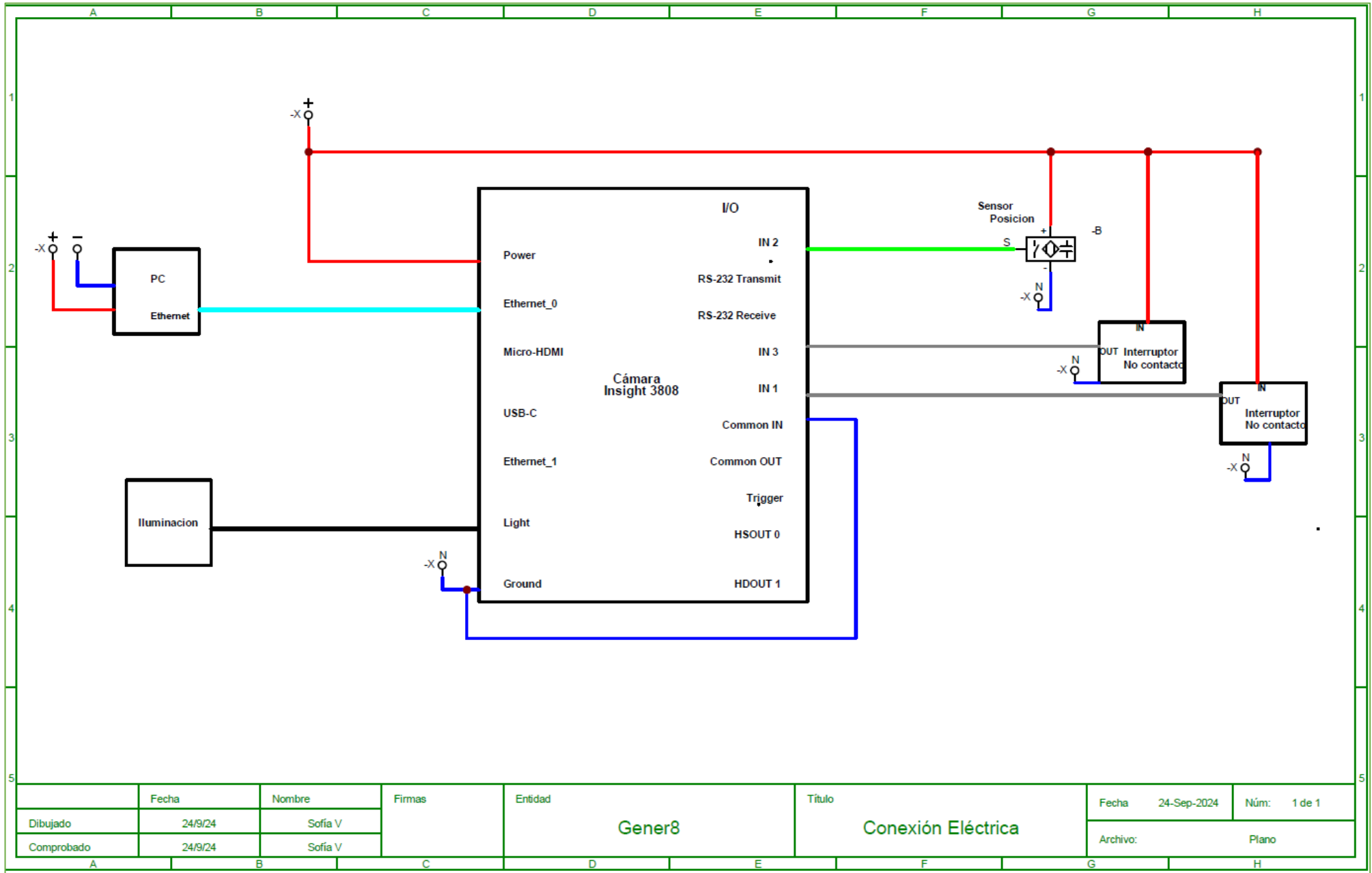


N.º	PIEZA	CANT.
1	PERFIL INFERIOR	1
2	PERFIL LATERAL	4
3	PERFIL SUPERIOR	1
4	PANEL POSTERIOR	1
5	PANEL LATERAL	2
6	PANEL SUPERIOR SIN AGUJERO	1
7	PUERTA	2
8	BISAGRA IZQUIERDA	4
9	BISAGRA DERECHA	4
10	BASE DE CÁMARA	1
11	PANEL SUPERIOR CON AGUJERO 1	1
12	PANEL INFERIOR	4
13	MULTIBLOCK ADHESIVO 1	1
14	MULTIBLOCK ADHESIVO 2	28
15	PANEL DE PUERTA	2
16	TAPETA	9
17	MANIJA DE PUERTA	4
18	ILUMINACIÓN	1
19	SOPORTE DE ILUMINACIÓN	1
20	CÁMARA	1
21	EN ISO 10642 - M3 X 8 - 8N	8
22	EN ISO 10642 - M4 X 10 - 10N	9
23	EN ISO 10642 - M3 X 10 - 10N	2
24	DIN 7991 - M3 X 8 --- 4.8N	18
25	DIN 7991 - M4 X 10 --- 5.6N	3
26	DIN 7991 - M3 X 10 --- 6.8N	6
27	PIEZA13PROYECTO	2
28	PIEZA14PROYECTO	2
29	ITEM_42854_TUERCA-8-ST-M4	4
30	PCB SCI-20098K	1
31	BASE DE PCB SCI-20098K	1
32	PLACA PARA SOPORTE DE PCB	1
33	PANEL SUPERIOR CON AGUJERO 2	1
34	SENSOR DE POSICIÓN	1
35	INTERRUPTOR DE PUERTA	2
36	ACTUADOR DE INTERRUPTOR DE PUERTA	2
37	SOPORTE DE INTERRUPTOR DE PUERTA	2
38	TORINILLOS AUTORROSCANTES DIN 7983-ST6.3X19	49
39	ITEM_37006_TUERCA-5-ST-M4-ZINCADO	1
40	ITEM_37006_TUERCA-5-ST-M4-ZINCADO	21

		<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>	
TODAS LAS DIMENSIONES EN MILÍMETROS A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO		Curso Trabajo Final de Graduación	Revisión
Nombre Sofia Valverde	Firma 	Fecha 31/10/2024	Descripción Explosionado de la estructura final
Dibujo	Revisión	Acabado It6	Nombre de Parte Estructura de montaje y captura de imagen
Aprob.	Fabri.	Material Aluminio 6063	Formato <b>A3</b>
Proyección 	TOLERANCIAS: X ± 0.50 mm XX ± 0.10 mm XXX ± 0.05 mm XXXX ± 0.01 mm ANGULARES: ± 1°	Tratamiento termico	Escala : 1:5 Hoja 7 de 7

# Apéndice B

## Plano Eléctrico



	Fecha	Nombre	Firmas	Entidad	Título	Fecha	Núm:
Dibujado	24/9/24	Sofía V		Gener8	Conexión Eléctrica	24-Sep-2024	1 de 1
Comprobado	24/9/24	Sofía V				Archivo:	Plano