



**DETECCIÓN DE DEFECTOS EN TARJETAS ELECTRÓNICAS DE
MEDIANA Y BAJA DENSIDAD MEDIANTE EL ANÁLISIS DE
COLORES, CONTORNOS Y SOMBRAS EN IMÁGENES
DIGITALES**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN
SISTEMAS INTELIGENTES MULTIMEDIA**

PRESENTA

ING. CARLOS EDUARDO JIMÉNEZ PELAYO

ASESORA:

DRA. CAROLINA RETA CASTRO

CONACyT – CIATEQ A.C.

ZAPOCAN, JALISCO, MARZO DE 2019



15 de enero de 2019

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno Ing. Carlos Eduardo Jiménez Pelayo, una vez revisada la Tesis o tesina titulada: "DETECCIÓN DE DEFECTOS EN TARJETAS ELECTRÓNICAS DE MEDIANA Y BAJA DENSIDAD MEDIANTE EL ANÁLISIS DE COLORES, CONTORNOS Y SOMBRAS EN IMÁGENES DIGITALES", autorizamos que el citado trabajo sea presentado por el alumno para la revisión del mismo con el fin de alcanzar el grado de Maestro en Sistemas Inteligentes Multimedia durante el Examen de Titulación correspondiente.

Y para que así conste se firma la presente a los 15 días del mes de enero del año 2019.

Dra. Carolina Reta Castro
Asesor Académico

Grado y nombre completo
Asesor en Planta



Santiago de Querétaro, Qro.
25 de febrero de 2019

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Directora
Posgrado CIATEQ
PRESENTE.

Por medio de la presente me estoy dirigiendo a Ud. de la manera más atenta, de que fui designado como revisor del trabajo de tesis del (la) Ing. **CARLOS EDUARDO JIMÉNEZ PELAYO**, del trabajo titulado:

"DETECCIÓN DE DEFECTOS EN TARJETAS ELECTRÓNICAS DE MEDIANA Y BAJA DENSIDAD MEDIANTE EL ANÁLISIS DE COLORES, CONTORNOS Y SOMBRAS EN IMÁGENES DIGITALES"

Después de haber leído, corregido e intercambiado información con el (la) estudiante antes mencionado(a), el trabajo de tesis que me fue entregado y haciendo resaltar que el (la) estudiante realizó todos los cambios que le fueron sugeridos a la tesis, ésta puede ser autorizada para su publicación y que de esta manera pueda iniciar los trámites correspondientes para iniciar el proceso de titulación.

Sin otro particular por el momento y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta y en beneficio del estudiante y la institución, agradezco la atención que se sirva prestar a la presente,

ATENTAMENTE

Daniel López Escogido
Doctor en Ciencias en Computación
Céd. 10537984

DEDICATORIA

A Susy, Carlitos y Andy, por su amor, tiempo y comprensión.

A todos mis familiares y amigos, por sus buenos deseos.

A Carolina, por su profesionalismo y entrega.

A Dios, que me otorgó esta oportunidad.

AGRADECIMIENTOS

A todo el personal docente del posgrado en Sistemas Inteligentes Multimedia de CIATEQ por brindar los conocimientos obtenidos a lo largo de su amplia experiencia, muy en especial a la Dra. Carolina Reta Castro por toda la asesoría brindada para el logro de este proyecto, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo otorgado para la realización de mis estudios de Posgrado, a la compañía IBM de México, S. de R. L. por el apoyo brindado para el desarrollo de este proyecto de investigación y a mis compañeros de clase por hacer de esta experiencia de aprendizaje un proceso sin igual.

Carlos Eduardo Jiménez Pelayo

Zapopan, Jalisco

Marzo de 2019

* * *

RESUMEN

Las tarjetas electrónicas utilizadas en los sistemas de cómputo han evolucionado en complejidad y reducción de tamaño de sus componentes y siguen requiriendo estrictos controles de calidad.

En el campus tecnológico de IBM de México en Guadalajara, el área de *POWER Systems* utiliza dichas tarjetas en sus productos, las cuales son liberadas para el embarque al cliente mediante una inspección visual. Dicha inspección es llevada a cabo de forma manual por el personal de manufactura y puede presentar ciertas deficiencias ya que depende de la experiencia del personal, la fatiga visual y la variabilidad del producto mismo.

Los sistemas de inspección AOI (por sus siglas en inglés: *Automated Optical Inspection*) de tarjetas electrónicas se pueden utilizar para realizar una inspección exhaustiva a las mismas, pudiendo detectar la gran mayoría de los defectos visuales. Sin embargo, los sistemas AOI suelen ser muy complejos, pueden requerir un entrenamiento para cada producto y exigen una inversión monetaria importante.

En esta tesis se propone un sistema de inspección visual de tarjetas electrónicas, para dar soporte en la etapa de control de calidad, considerando diversas técnicas de visión por computadora, como la conversión de espacios de color, el análisis de contornos, el uso y análisis de sombras, entre otros. El sistema propuesto consiste en un método que incluye una serie de algoritmos que ofrecen información apropiada para asistir al personal en la inspección de dichas tarjetas. La implementación de los algoritmos en software de fuente abierta, así como el uso de un sistema prototipo ad hoc para la adquisición de

imágenes de tarjetas electrónicas, permiten que el sistema de visión por computadora propuesto se considere de bajo costo.

El sistema propuesto permite detectar diferencias entre tarjetas electrónicas de referencia (sin defectos) y aquellas bajo inspección, mediante el análisis del color, contorno y sombras de los componentes de dichas tarjetas. El sistema permite la detección de fallas por daños a componentes, desprendimiento y mala ubicación de componentes, componentes faltantes y rayones en la tarjeta. El sistema alcanza una precisión entre 66% y 95% utilizando el análisis por color, entre 50% y 70% empleando el análisis por contornos y entre 72% y 86% mediante el análisis por sombras. Sin embargo, los algoritmos propuestos en dichos análisis se pueden complementar para mejorar la precisión global y ofrecer una solución más robusta al problema de inspección abordado.

Palabras claves:

Ingeniería y tecnología; ingeniería de los ordenadores; sistemas de información, diseño y componentes; visión por computadora; AOI; inspección de tarjetas electrónicas; defectos visuales; análisis de color; análisis de contornos; análisis de sombras.

ABSTRACT

The electronic cards used in computer systems have evolved in complexity and size reduction of their components and demand a continuous and strict quality control.

POWER Systems, located at the IBM de México Technological Campus in Guadalajara, uses such electronic cards within its products, which are released for their final shipment to a Customer through a visual inspection. This inspection is fulfilled in a manual fashion by manufacturing personnel. This can create certain deficiencies since this operation depends on the experience of the inspector, visual fatigue, plus the variability that can be found in the product itself.

The Automated Optical Inspection (AOI) systems can be used to perform an exhaustive inspection to electronic cards. These systems should be able to detect most of the visual defects. However, AOI systems can be complex, they normally require special training for each product being inspected and require a costly investment.

A computer vision system for the inspection of electronic cards which integrates color, contour, and shadows analysis techniques to support the quality control stage is proposed in this thesis. The proposed system includes several algorithms that at the end will offer supportive information to the users when inspecting electronic cards. The usage of open-source software to implement the algorithms, as well as the availability of an ad-hoc prototype system devised for the acquisition of images of the electronic cards, allow the proposed system to be cost-efficient.

The proposed system helps to detect differences among the reference electronic cards (with no defects) and those under inspection, through the analysis of colors, contours, and shadows cast by the components of the cards. The system allows the detection of potential fails due to components with physical damage, loosed, misplaced or missing, as well as damages on the card, such as dents or scratches. The system achieves a precision between 66% and 95% using the color analysis, between 50% and 70% using the contour analysis, and between 72% and 86% using the shadow analysis. But most important, the proposed algorithms used in these analyses can complement each other to improve the global precision of the system result to offer a more robust solution to the described inspection problem.

Keywords:

Engineering and technology; computer engineering; information systems, design and components; computer vision; AOI; inspection of electronic cards; visual defects; color analysis; contour analysis; shadow analysis.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	I
ABSTRACT	III
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
GLOSARIO DE TÉRMINOS	XV
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Justificación	3
1.4 Hipótesis	3
1.5 Objetivos.....	4
1.6 Método	5
1.7 Alcances y limitaciones	6
1.8 Organización del documento	7
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	9

2.1 Sistemas AOI	9
2.2 Sistemas de visión por computadora	12
2.2.1 Imágenes digitales.	13
2.2.2 Intensidad.....	13
2.2.3 Formatos de imágenes	14
2.2.4 Tipos de imágenes.....	14
2.3 Sistemas de adquisición de imágenes digitales	15
2.3.1 Sensor de la cámara digital	15
2.3.2 Lentes.....	17
2.3.3 Distancia de trabajo.....	17
2.3.4 Campo de visión	18
2.3.5 Campo de visión angular	18
2.3.6 Tamaño del sensor.....	18
2.3.7 Resolución de la imagen	19
2.3.8 Profundidad de color	20
2.3.9 Apertura.....	20
2.3.10 Longitud focal del lente.....	21
2.3.11 Velocidad de obturación.....	21
2.3.12 Profundidad de campo	22
2.3.13 Velocidad de fotogramas	22
2.3.14 Resolución espacial del objeto (Aumento primario)	22
2.4 Iluminación.....	23
2.4.1 Iluminación LED.....	24
2.4.2 Iluminación por fibra óptica	25
2.4.3 Iluminación fluorescente.....	25

2.5 Procesamiento y análisis de imágenes digitales	25
2.5.1 Espacios de color.....	25
2.5.2 Calibración de cámaras digitales	27
2.5.3 Filtrado de imágenes	28
2.5.4 Agudizamiento de la imagen	29
2.5.5 Detección de contornos.....	29
2.5.6 Suavizado de la imagen.....	29
2.5.7 Circunvolución.....	30
2.5.8 Operaciones morfológicas.....	32
2.5.9 Transformaciones geométricas	32
2.5.10 Asignación de intensidad mediante operaciones locales.....	33
2.5.11 Segmentación basada en color.....	33
2.5.12 Extracción de características visuales.....	34
2.5.13 Substracción del fondo.....	35
2.5.14 Ecualización de histograma de una imagen	35
2.6 Discusión	36
CAPÍTULO 3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	38
3.1 Análisis de sombras en imágenes digitales	38
3.2 Sistemas de inspección óptica automatizada	40
3.3 Técnicas de inspección visual	42
3.4 Análisis de color y resta de píxeles.....	44
3.5 Cálculo de contornos y análisis	45
3.6 Discusión	45

CAPÍTULO 4. MÉTODO PROPUESTO..... 48

4.1 Esquema general del método propuesto	48
4.2 Sistema prototipo para la adquisición de imágenes digitales.....	50
4.3 Cálculo de parámetros para un sistema óptico de captura de imágenes digitales.....	50
4.3.1 Cálculo de la resolución y amplificación para el sensor de la cámara.....	52
4.3.2 Cálculo de la longitud focal y el campo de visión angular	53
4.4 Software utilizado para el desarrollo del proyecto	54
4.5 Procedimiento para la eliminación del fondo de la imagen	55
4.6 Procedimiento de registro entre imágenes.....	57
4.7 Algoritmo para el análisis de colores.....	59
4.8 Algoritmo para el análisis de contornos.....	61
4.9 Algoritmo para el análisis de sombras.....	63
4.10 Muestra de resultados.....	65
4.11 Algoritmo para identificar zonas de interés	66

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL 68

5.1 Captura de imágenes	68
5.2 Eliminación del fondo de la imagen	69
5.3 Registro entre imágenes	71
5.4 Resultados del algoritmo para el análisis de colores.....	72
5.5 Resultados del algoritmo para el análisis de contornos.....	79
5.6 Resultados del algoritmo para el análisis de sombras.....	87
5.7 Resultados del algoritmo para identificar zonas de interés.....	91
5.8 Consideraciones para el despliegue de resultados	94
5.8.1 <i>Combinación de canales individuales en espacio de color RGB..</i>	94
5.8.2 <i>Propuesta para interfaz de usuario.....</i>	98
5.9 Evaluación del análisis experimental de algoritmos	100
5.9.1 <i>Facilidad de reconocimiento de defectos por un operador.....</i>	100
5.9.2 <i>Evaluación de los algoritmos propuestos para el reconocimiento de defectos.....</i>	100
5.9.3 <i>Descripción de la prueba de diagnóstico para la identificación de zonas de interés</i>	103
5.9.4 <i>Evaluación de la prueba de diagnóstico para la identificación de zonas de interés</i>	105
5.10 Tiempos de ejecución.....	107

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES 110

6.1 Conclusiones del proyecto	110
6.2 Aportación de la tesis	114
6.3 Patente en trámite.....	114
6.4 Trabajo Futuro	115

BIBLIOGRAFÍA 116**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Taxonomía de los sistemas AOI	10
Figura 2. Evaluación del contraste de la imagen [2].....	11
Figura 3. Parámetros fundamentales en un sistema de imágenes digitales [10].	17
Figura 4. Límite de resolución en una cámara [10]	19
Figura 5. Distintos tipos de iluminación [4]	24
Figura 6. Una ilustración de los tres canales en el espacio de color CIE L*a*b* [20]	26
Figura 7. Ejemplo de distorsión radial [21]	27
Figura 8. Imagen con patrones de calibración [21]	28
Figura 9. Imagen corregida mediante la calibración [21]	28
Figura 10. Imagen de ejemplo con un <i>kernel</i> de 3 x 3 píxeles [24]	30

Figura 11. Ejemplo de detección de contornos [24]	31
Figura 12. <i>Kernel</i> para difuminado [24]	31
Figura 13. <i>Kernels</i> para filtro Sobel [24]	31
Figura 14. Un ejemplo de dilatación y erosión [23]	32
Figura 15. (a) Imagen con poco contraste y (b) su histograma [26]	35
Figura 16. (a) Imagen con el contraste de su histograma ecualizado y (b) el histograma resultante [26]	36
Figura 17. Ejemplo de modelo de eliminación de sombras y su entropía: (a) imagen original, (b) imagen con la sombra eliminada, (c) componente de iluminación y (d) histogramas y entropías de las imágenes a, b y c [29].	39
Figura 18. Esquema del procesamiento y análisis de imágenes	48
Figura 19. Ejemplos de fallas o defectos en las tarjetas electrónicas	50
Figura 20. Distancia de la cámara digital al objeto	51
Figura 21. Área captada por la cámara digital en la posición establecida.....	52
Figura 22. Elemento estructural en forma de elipse/círculo	56
Figura 23. Puntos de coincidencia para el registro de una imagen.....	58
Figura 24. Elemento estructural en forma de cruz.....	62
Figura 25. Captura de imágenes para una sección de la tarjeta electrónica....	68
Figura 26. Secuencia de pasos para eliminar el fondo de la imagen: (a) disminución de la intensidad de las sombras, (b) conversión a escala de grises y	

normalización, (c) detección de contornos, (d) dilatación, (e) relleno de áreas cerradas, (f) erosión, (g) detección del contorno principal, (h) selección del área de interés70

Figura 27. Secuencia del proceso de registro entre imágenes: (a) puntos de coincidencia, (b) imagen de referencia, (c) imagen registrada71

Figura 28. Imágenes de (a) referencia y (b) bajo inspección, en formato RGB..73

Figura 29. Imágenes en (a) espacio de color CIE $L^*a^*b^*$, (b) canal L^* , (c) canal a^* y (d) canal b^* 73

Figura 30. Sección de imagen en espacio de color CIE $L^*a^*b^*$ (a) previo al efecto de *blur* y (b) posterior al mismo74

Figura 31. Imagen bajo inspección (a) previo al ajuste de intensidad y (b) posterior al mismo74

Figura 32. Imagen (a) previa al efecto de pixelado y (b) posterior al mismo75

Figura 33. Imágenes de las restas de valores de intensidad de (a) tarjeta de referencia menos tarjeta bajo inspección y (b) tarjeta bajo inspección menos tarjeta de referencia76

Figura 34. Imagen con la distancia de color entre los píxeles de cada imagen 77

Figura 35. Imágenes de los canales separados: (a) I_{1-2_L} , (b) I_{2-1_L} , (c) I_{1-2_A} , (d) I_{2-1_A} , (e) I_{1-2_B} , (f) I_{2-1_B}78

Figura 36. Imágenes de (a) referencia y (b) bajo inspección, en escala de grises80

Figura 37. Imágenes de (a) referencia y (b) bajo inspección, después de la ecualización de sus histogramas	81
Figura 38. Imágenes de (a) referencia y (b) bajo inspección, después del efecto de difuminado.....	82
Figura 39. Imágenes con los contornos identificados por el operador <i>Canny</i>	83
Figura 40. Imágenes con los contornos identificados para (a) la tarjeta de referencia y (b) la tarjeta bajo inspección	84
Figura 41. Imagen resultante de combinar los contornos de ambas imágenes, resaltando los traslapes con color verde.....	85
Figura 42. Imágenes con (a) los contornos traslapados eliminados y (b) simplificación de los segmentos remanentes	86
Figura 43. Resultado de la resta de intensidades de la imagen de referencia menos la imagen bajo inspección	88
Figura 44. Resultado de la resta de intensidades de la imagen bajo inspección menos la imagen de referencia.....	89
Figura 45. Suma de resultados de la resta de intensidades de la imagen de referencia menos la imagen bajo inspección, cuando se utiliza iluminación opuesta	90
Figura 46. Suma de resultados de la resta de intensidades de la imagen bajo inspección menos la imagen de referencia, cuando se utiliza iluminación opuesta	91
Figura 47. Bloques de zonas de interés en (a) imagen del algoritmo de sombras, (b) imagen original RGB	92

Figura 48. Detalle del espesor y color de los bloques de zonas de interés	93
Figura 49. Combinación de canales individuales BGR de dos imágenes bajo comparación: (a) canal 0, (b) canal 1 y (c) canal 2	95
Figura 50. Combinación de canales individuales BGR de dos imágenes bajo comparación con iluminación lateral: (a) canal 0, (b) canal 1 y (c) canal 2	97
Figura 51. Interfaz de usuario propuesta para el proyecto	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación entre sensores CCD y CMOS	16
Tabla 2: Longitud focal y aperturas máxima y mínima de la cámara Nikon D3400	21
Tabla 3. Facilidad de identificación visual con los diversos algoritmos	101
Tabla 4: Prueba de diagnóstico para VP, FP, FN y VN	103
Tabla 5: Resultados de la prueba de diagnóstico para VP, FP, FN y VN	106
Tabla 6: Resultados de los tiempos de ejecución en segundos del sistema de visión	108

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Símbolo	Descripción
AOI	Inspección óptica automatizada (<i>Automated Optical Inspection</i>)
BGR	Formato de imagen utilizado por <i>OpenCV</i> conformado por tres canales ordenados como azul, verde y rojo (<u>B</u> lue, <u>G</u> reen, <u>R</u> ed)
FOI	Campo de interés (<i>Field of interest</i>)
LED	Diodo emisor de luz (<i>Light Emitting Diode</i>)
PCI	Interconexión de componentes periféricos (<i>Peripheral Component Interconnect</i>)
PCIe	PCI express
POWER	Acrónimo de <i>Performance Optimization With Enhanced RISC</i>
RGB	Formato de imagen estándar conformado por tres canales ordenados como rojo, verde y azul (<u>R</u> ed, <u>G</u> reen, <u>B</u> lue)
SNR	Relación señal a ruido (<i>Signal-to-noise ratio</i>)

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

IBM *POWER Systems* es una familia de servidores de cómputo que son ensamblados, probados funcionalmente y distribuidos globalmente desde el Salto, Jalisco, México. Entre los distintos productos que se distribuyen se encuentran las tarjetas electrónicas tipo PCIe (*Peripheral Component Interconnect Express*) y similares, las cuales desempeñan distintas funciones como la comunicación y control de dispositivos mediante Ethernet y fibra óptica, permitiendo la expansión de las capacidades de los servidores de cómputo.

Previo al empaque final de estas tarjetas electrónicas, en el área de manufactura se lleva a cabo una inspección visual realizada por operadores de producción, la cual presenta inconvenientes como: 1) escapes de defectos por falta de experiencia del operador y 2) escapes de defectos debido a la fatiga visual.

Los defectos visuales que se pueden presentar en las tarjetas electrónicas pueden catalogarse en dos casos: 1) defectos visuales que pueden no ser detectados inmediatamente por las pruebas funcionales, pero pueden derivar en una falla funcional de la tarjeta con el paso del tiempo y 2) defectos visuales que no representan una falla funcional, pero pueden dar una mala impresión al cliente. Se han presentado algunos escapes aislados de defectos visuales en tarjetas electrónicas, por lo que su impacto con el cliente es un tema que preocupa a la gerencia de Calidad de *POWER Systems*.

1.2 Planteamiento del problema

La inspección de tarjetas electrónicas en el área de producción de *POWER Systems* es un proceso manual realizado por operadores, que puede derivar en escapes con defectos visuales hacia el cliente final. Estos defectos pueden desencadenar una falla funcional que se manifiesta con el tiempo. Para este problema, en esta tesis se propone un sistema para la inspección visual de tarjetas electrónicas que brinde apoyo a los operadores que realizan la inspección; de manera que, al señalar las diferencias en la tarjeta electrónica bajo inspección respecto a una tarjeta de referencia, les permite identificar daños o defectos y decidir la disposición de dicha tarjeta, ya sea su aceptación o rechazo.

El sistema de visión planteado incluye tres algoritmos que permiten efectuar distintos tipos de análisis (color, contorno y sombra) sobre las imágenes de las tarjetas. Se busca que los algoritmos propuestos puedan ser replicados de manera consistente para distintos modelos de tarjetas, permitiendo la reducción del número de escapes del actual proceso de inspección.

Con los distintos tipos de análisis se busca identificar diferencias que pueden significar anomalías en la tarjeta, tales como un componente faltante, un componente deformado, o un cambio de versión en la tarjeta. Las diferencias también pueden señalar casos permisibles debido al diseño y especificaciones de la tarjeta, como la ubicación holgada de algunos componentes o la distribución y formato del texto para componentes similares provenientes de distintos proveedores.

1.3 Justificación

El escape de tarjetas electrónicas con defectos visuales hacia clientes afecta de forma negativa a la compañía, pues esto puede desencadenar en fallas funcionales de los equipos del cliente en una temprana vida útil o simplemente cuestionar la calidad del producto por su apariencia. Este tipo de situaciones pueden afectar la decisión de una compra posterior por parte del cliente con la consecuente disminución de presencia en el mercado y sus implicaciones financieras. Además, cubrir la garantía de un producto implica gastos extras que afectan los costos y disminuyen la competitividad.

Este proyecto beneficia a la compañía, pues explora una opción innovadora para robustecer el proceso actual de inspección y mejorar la calidad reduciendo el número de escapes y da valor agregado para competir dentro de la compañía con otras plantas ubicadas en Asia y Norteamérica.

Aunque en el mercado se pueden encontrar sistemas robustos automatizados dedicados a este tipo de inspección, como los sistemas AOI (*Automated Optical Inspection*), éstos son muy costosos y su adquisición afectaría directamente el precio de los productos. El sistema de visión por computadora propuesto en esta tesis es una solución viable y de bajo costo que sirve de apoyo al proceso de inspección visual; además, integra algoritmos robustos para llevar a cabo la tarea de detección de desperfectos en las tarjetas electrónicas de los productos en un entorno controlado.

1.4 Hipótesis

Mediante la implementación de un sistema de bajo costo para la detección de defectos en tarjetas electrónicas basado en el análisis de las características de

color, contornos y sombras de imágenes digitales se puede disminuir el riesgo de que se libere una tarjeta electrónica con defectos.

1.5 Objetivos

Objetivo general

Diseñar un sistema de visión por computadora para la inspección automática de tarjetas electrónicas de mediana y baja densidad de componentes, que permita identificar las diferencias en la apariencia y ubicación de componentes entre una tarjeta de referencia y una tarjeta bajo inspección, mediante el análisis de colores, contornos y sombras en imágenes digitales. El sistema de visión por computadora proporcionará un soporte adicional al proceso de inspección manual actual, brindándole al operador información relevante para que pueda asignar una mejor disposición a la tarjeta, reduciendo la cantidad de escapes potenciales hacia los clientes y disminuyendo los costos involucrados por garantías.

Objetivos específicos

1. Diseñar un método para la generación del modelo de la tarjeta de referencia y la extracción de sus características visuales intrínsecas, a partir de imágenes de tarjetas en buenas condiciones.
2. Utilizar un sistema prototipo que permita adquirir imágenes digitales de las tarjetas electrónicas de referencia y aquellas a inspeccionar bajo condiciones controladas de luz, posición y rotación de la tarjeta.
3. Diseñar un método con un conjunto de algoritmos que mediante el análisis de las características de color, contornos y sombras de las imágenes digitalizadas permitan identificar y señalar las diferencias de patrones entre tarjetas de referencia y tarjetas a inspeccionar.

4. Realizar pruebas de concepto utilizando tarjetas electrónicas de muestra, con y sin defectos, para validar que los resultados de la comparación entre tarjetas son replicables con otros modelos de tarjetas.
5. Plantear el prototipo del sistema de inspección para su utilización en un ambiente de manufactura, considerando el hardware y software requeridos.

1.6 Método

El método planteado para el diseño de los algoritmos de análisis de imágenes del sistema prototipo es el siguiente:

1. Captura de imágenes de la tarjeta electrónica de referencia y la tarjeta bajo inspección a través de un sistema prototipo para la adquisición de imágenes bajo condiciones controladas de luz, posición y rotación de la tarjeta.
2. Eliminación del fondo en ambas imágenes, con lo cual se deja en las imágenes solo el área de interés a inspeccionar, es decir, la tarjeta electrónica.
3. Registro de la imagen bajo inspección respecto de la imagen de referencia, lo que permite alinear las imágenes de manera que las posiciones de sus componentes concuerden.
4. Procesamiento y análisis de imágenes utilizando descriptores y métricas de distancia para determinar las similitudes y discrepancias relevantes entre la tarjeta de referencia y la tarjeta bajo inspección, tales como cambio de posición entre los componentes, falta de componentes, daños físicos y diferencias en la apariencia de las tarjetas.
5. Despliegue de resultados, con lo cual los operadores del sistema pueden visualizar los detalles encontrados y realizar una mejor toma de decisiones

(basada en el análisis de datos visuales) sobre la calidad del producto bajo inspección.

1.7 Alcances y limitaciones

El sistema de visión propuesto para la inspección de tarjetas electrónicas se acota a lo siguiente:

- Considera que las tarjetas electrónicas a inspeccionar tienen un tamaño apropiado para ser captadas por el elemento óptico del sistema propuesto. La referencia es una tarjeta PCIe con mediana o baja densidad de componentes según la especificación IPC (*international trade association for the printed-board and electronics assembly industries*) para tarjetas, cuyas dimensiones estándar son 10.6 cm de ancho y pueden tener entre 17.4 y 31.8 cm de largo.
- Se inspecciona la cara principal de la tarjeta, es decir, donde se localiza la mayor parte de los componentes montados.
- Se acota un área de la tarjeta como prioridad para la inspección (donde los componentes principales o más críticos de la tarjeta se encuentran montados). Si las condiciones son óptimas, se considera toda el área de dicha cara de la tarjeta.
- Para la comparación de tarjetas se cuenta con una imagen patrón (sin defectos) previamente seleccionada, que servirá como referencia de la tarjeta a inspeccionar con el mismo número de parte.
- Las condiciones de captura de la imagen de la tarjeta a inspeccionar, como distancia e iluminación, deben ser similares a la imagen patrón para descartar variabilidad en la comparación.

- El prototipo de captura puede tomar una o varias imágenes para cada tarjeta electrónica a inspeccionar a partir de una vista superior predeterminada.
- Un conjunto de algoritmos de visión por computadora identifica las diferencias potenciales entre la tarjeta de referencia y la tarjeta bajo inspección. Estas diferencias pueden implicar componentes faltantes, deformaciones, daños visuales e incluso desfase de componentes que se encuentran dentro de especificaciones.
- El sistema no decide la disposición de la tarjeta, sino el operador, en base a las diferencias encontradas por el algoritmo.

1.8 Organización del documento

La tesis está organizada de la siguiente manera.

En el Capítulo 2 se describe el marco teórico, en donde se enfatizan los conceptos fundamentales de los sistemas automatizados de inspección visual, así como los parámetros de un sistema de imágenes digitales que puede ser utilizado en la solución propuesta.

En el Capítulo 3 se presenta una revisión del estado del arte en cuanto a sistemas de visión similares presentados en artículos de divulgación científica y patentes.

En el Capítulo 4 se expone el método propuesto para la solución del problema, detallando el algoritmo de procesamiento y análisis de imágenes.

En el Capítulo 5 se presentan los detalles del análisis experimental realizado con el método propuesto, así como las variaciones y ajustes hechos para lograr obtener mejores resultados en la práctica.

En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo desarrollado, así como el trabajo futuro propuesto. Por último, se enlistan las referencias utilizadas en esta tesis.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan las generalidades de los sistemas AOI y los fundamentos de los sistemas de adquisición, procesamiento y análisis de imágenes digitales, así como de tópicos relevantes como la iluminación artificial, que sirvieron de base para la realización de este proyecto. En los Capítulos 3 y 4 se presentan el estado del arte y el método propuesto para la solución del problema planteado, respectivamente, los cuales hacen referencia a algunos de los conceptos descritos en este capítulo.

Como solución a la problemática expuesta en el Capítulo 1 de la tesis, se propone el diseño y desarrollo de un sistema de visión por computadora para la inspección de tarjetas electrónicas, el cual permite examinar la cara principal de éstas e identificar sus posibles defectos.

2.1 Sistemas AOI

El nombre que se utiliza para las actividades automatizadas de visión por computadora en la industria, donde no hay un contacto físico directo con la tarjeta para identificar fallas o defectos es conocido como AOI. Una aplicación de los sistemas AOI es en la inspección de las tarjetas de circuitos impresos, donde una o más cámaras revisan cada circuito para detectar fallas críticas y defectos de calidad [1]. Los sistemas AOI intentan detectar los problemas en los procesos productivos y minimizar los errores producidos para incrementar la calidad de los productos terminados [1]. Hoy en día, dependiendo del problema de inspección que se busque atacar, los sistemas AOI utilizan diferentes tipos de cámaras, tales como las monocromáticas, de color, infrarrojas y cámaras 3D, que generan imágenes digitales que pueden procesarse y analizarse para medir objetos, detectar defectos en las superficies, reconocer patrones, clasificar objetos, entre otras tareas [1].

Un sistema AOI se compone por al menos una cámara electrónica, un sistema de iluminación, una computadora y un software para el procesamiento y análisis de las imágenes [2]. Las cámaras electrónicas se construyen con un sensor de imagen de estado sólido, ya sea del tipo CCD (dispositivo de carga acoplado, en inglés: *charged-couple device*) o CMOS (semiconductor de óxido-metal complementario, en inglés: *complementary metal-oxide semiconductor*) [2].

Los sistemas AOI se pueden clasificar de distintas maneras como las presentadas en la Figura 1.

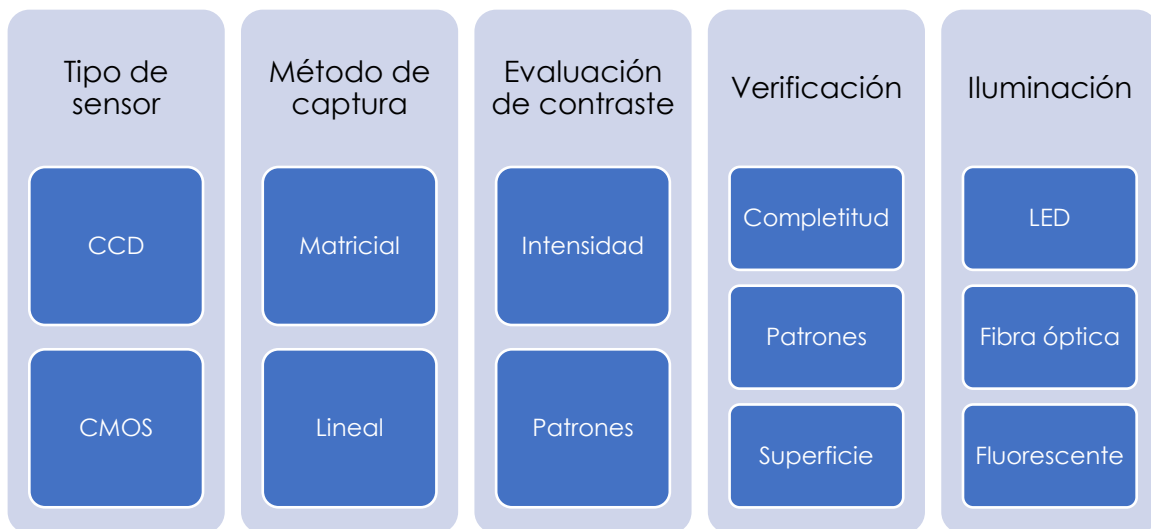


Figura 1. Taxonomía de los sistemas AOI

Por el tipo de sensor utilizado [3] se clasifican en:

- CCD, un sensor análogo que requiere circuitería adicional para el procesamiento de imágenes.
- CMOS, que por su proceso de producción más económico tiende a desplazar el uso de sensores CCD.

Por el método de captura de la imagen [3] se clasifican en:

- Cámara matricial, en donde se captura el campo de interés (FOI, por sus siglas en inglés: *field of interest*).
- Cámara lineal (en inglés: *line scan camera*), que es un proceso similar al utilizado por el escáner de una máquina copiadora.

Por el método de evaluación del contraste de la imagen [2] se clasifican en:

- Contraste en la intensidad; éste se puede definir utilizando un valor de umbral, de manera que se pueden distinguir zonas claras y oscuras, tal como se presenta en la imagen superior de la Figura 2.
- Contraste de patrones; éste requiere un procesamiento especial de la imagen tal como el filtrado de frecuencia espacial o filtros que detectan la orientación preferida de los contornos. En la imagen inferior de la Figura 2 se puede apreciar la zona de la izquierda cuyo patrón presenta líneas verticales, mientras que la zona de la derecha presenta patrones en diagonal.



Figura 2. Evaluación del contraste de la imagen [2].

Por el tipo de verificación [2] se clasifican en:

- Verificación de completitud. En una tarjeta electrónica de producción en serie, colocada en una posición fija para su inspección y bajo condiciones de iluminación constantes, se toma una foto digital y pixel a pixel es comparada con una imagen de referencia, permitiendo identificar, por ejemplo, algún objeto faltante en la imagen diferencial.

- Verificación de patrones. Su uso permite identificar y localizar los diferentes componentes de un ensamble y realizar su comparación con el modelo del producto en cuestión. Este caso es muy práctico, por ejemplo, cuando el producto presenta distinta configuración en su color, modelo y tamaño.
- Verificación de la superficie. Ésta busca detectar irregularidades en la superficie. Se logra mediante el análisis de las similitudes o diferencias encontradas en imágenes de una misma área capturadas con distinto ángulo de iluminación.

Por el tipo de iluminación [4] se clasifican en:

- LED, cuya luz intensa y uniforme es emitida por diodos que tienen un período largo de vida.
- Fibra óptica, que permite una luz intensa y fría dirigida por sus guías de luces.
- Luz fluorescente, que emite una luz brillante y distribuida en forma uniforme.

Por su intensidad, bajo costo y longevidad en este proyecto se utiliza la tecnología de iluminación LED.

2.2 Sistemas de visión por computadora

El área de visión por computadora comprende distintos campos de conocimiento, como las ciencias computacionales, las matemáticas y la ingeniería electrónica. Ésta considera los medios para adquirir, procesar, analizar y entender las imágenes y videos del mundo real de manera que replica la visión humana, permitiendo utilizar dicha información para la toma de decisiones [5]. A continuación, se presentan los conceptos más relevantes del área de visión por computadora empleados en la tesis.

2.2.1 Imágenes digitales.

Los pixeles son los sitios que forman una matriz en el sensor de la cámara digital donde incide la luz de la imagen a capturar [6]. El término pixel es la conjugación de las palabras *picture* (pix) y *element* (el). La imagen se divide en estos pixeles discretos, los cuales pueden ser transferidos a un monitor para ser visualizados. Los pixeles pueden ser foto diodos o foto capacitores, que generan una carga proporcional a la cantidad de luz incidente sobre cada uno de ellos [6].

En las cámaras digitales, los pixeles son por lo general cuadrados en un rango entre 3 μm y 10 μm . Aunque los sensores suelen ser especificados por la cantidad de pixeles, el tamaño individual es importante en la óptica de las imágenes. Mientras más grande es el pixel, mayor es la capacidad de saturación y mejor la relación señal a ruido (SNR, por sus siglas en inglés: *signal-to-noise ratio*).

Las imágenes digitales se componen de arreglos o matrices de dos dimensiones de pixeles. Los pixeles dictan todo sobre la imagen digital, como el tamaño del archivo, dimensión, color, transparencia y formato [7]. La relación de aspecto de una imagen es la relación entre los pixeles de ancho por alto de la misma [7], por ejemplo, para la imagen de 640 x 480 pixeles la relación es 4 : 3.

2.2.2 Intensidad

Los pixeles se almacenan en fotoceldas sensibles a la luz en un sensor ya sea del tipo CCD (por sus siglas en inglés: *charge-couple device*) o CMOS (por sus siglas en inglés: *complementary metal-oxide semiconductor*) [8]. Estas fotoceldas registran la intensidad o brillo de la imagen utilizando el sistema binario, para luego ser procesada y almacenada en la memoria de la cámara donde cada pixel es representado en una escala finita, por ejemplo, de 0 a 255 niveles de intensidad.

2.2.3 Formatos de imágenes

Existe una variedad de formatos digitales para la captura y almacenamiento de imágenes en las cámaras digitales [8]. Los formatos más comunes son JPEG, TIFF y RAW. El formato JPEG (por sus siglas en inglés: *Joint Photographic Experts Group*) es un formato muy utilizado, con un algoritmo de compresión de la imagen que le permite guardar la información con tres niveles de calidad. Su algoritmo de compresión hace que la imagen se vaya deteriorando con cada edición [8]. El formato TIFF (por sus siglas en inglés: *Tagged Image File Format*) almacena la imagen sin compresión, siendo el estándar para gráficos e impresiones. Este formato puede aceptar ciertos niveles de compresión, pero la información almacenada es mucho mayor que su contraparte JPEG [8]. El formato RAW (crudo) se considera un negativo digital puro que contiene la información original del sensor, sin ningún tipo de manipulación binaria que requieren los demás formatos, siendo de menor tamaño que el formato TIFF [8]. Se pueden encontrar otros formatos de imágenes digitales como BMP, EPS, GIF, PICT, PNG, etc.

2.2.4 Tipos de imágenes

Una imagen digital se puede representar como una matriz de $N \times M$ píxeles de ancho por alto y además puede contener uno o varios canales para almacenar la información, donde cada canal se puede entender como una capa que se superpone a las otras para generar un efecto, por ejemplo, el color. Cada píxel de la imagen se puede identificar con una posición o coordenada, por ejemplo, (x, y) . A continuación, se presentan los tipos de imágenes digitales empleadas en la tesis:

- **Imágenes binarias.** Una imagen binaria consiste en una matriz de píxeles con dos valores posibles: encendido, con su máxima intensidad (255) y apagado, con intensidad 0; con lo cual se puede representar una imagen en blanco y negro utilizando un solo canal.
- **Imágenes en escala de grises.** Una imagen en escala de grises requiere también de una matriz con un solo canal, pero a diferencia de la imagen en blanco y negro, cada píxel puede contener una intensidad que varía dentro del rango asignado, por ejemplo, de 0 a 255.
- **Imágenes a color.** Una imagen a color requiere de al menos tres matrices o canales, donde cada uno de ellos almacena la intensidad de cada píxel para un color específico, por ejemplo, el Rojo, Verde y Azul (formato RGB), de manera que la superposición de estos tres canales puede generar una amplia gama de colores distintos (es decir, $256 \times 256 \times 256 = 16,777,216$ colores si la intensidad de cada canal tiene rango de 0 a 255).

2.3 Sistemas de adquisición de imágenes digitales

2.3.1 Sensor de la cámara digital

El elemento más importante de toda cámara digital es el sensor, que es el dispositivo de estado sólido que contiene millones de foto detectores discretos. Actualmente predominan dos tipos de sensores, CCD y CMOS [6].

En la Tabla 1 se presenta una comparación general entre las características de los sensores CCD y CMOS [6].

Tabla 1: Comparación entre sensores CCD y CMOS

Característica del sensor	CCD	CMOS
Señal del pixel	Paquete de Electrones	Voltaje
Señal del chip	Analógico	Digital
Factor de llenado	Alto	Moderado
Velocidad de respuesta	Moderada	Moderada - Alta
Nivel de ruido	Bajo	Moderado - Alto
Rango dinámico	Alto	Moderado
Uniformidad	Alta	Baja
Resolución	Baja - Alta	Baja - Alta
Velocidad	Moderada - Alta	Alta
Consumo de energía	Moderado - Alto	Bajo
Complejidad	Baja	Moderada
Costo	Moderado	Moderado
Manejo del ruido	Alto	Moderado
Tiempos de exposición mayores	Alto	Moderado

Las imágenes digitales que se analizan en este proyecto son capturadas usando una cámara Nikon modelo D3400; esta cámara tiene un sensor APS-C (del inglés: *Advanced Photo System type-C*) a colores cuya tecnología es CMOS con dimensiones de 23.5 x 15.6 mm y un área del sensor de 366.60 mm² [9].

Los sensores integrados en una cámara digital cumplen con una serie de parámetros fundamentales tal como se muestra en la Figura 3 [10], los cuales se describen en las siguientes secciones.

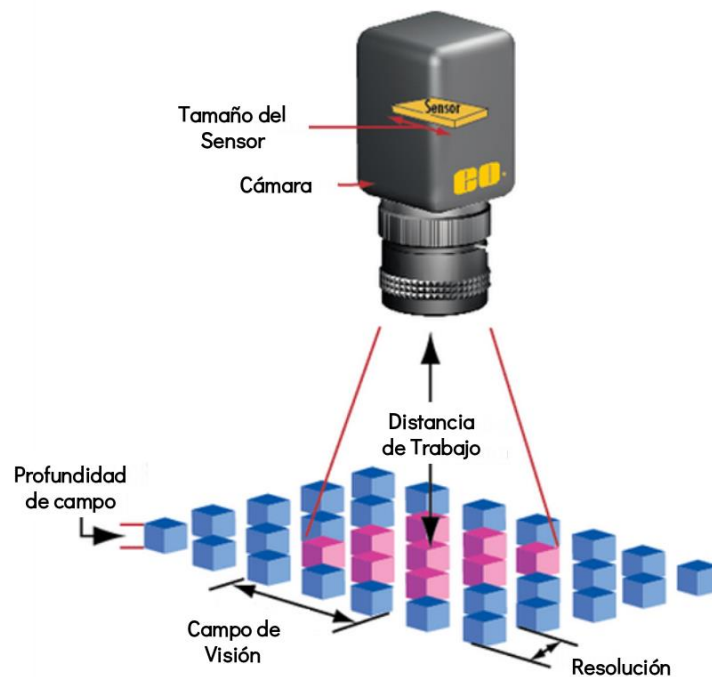


Figura 3. Parámetros fundamentales en un sistema de imágenes digitales [10]

2.3.2 Lentes

Están fabricados con vidrio de alta calidad, con la forma precisa para enfocar los rayos de luz y formar una imagen nítida en el sensor sensible a luz de la cámara [8].

2.3.3 Distancia de trabajo

La distancia de trabajo (WD, por sus siglas en inglés: *working distance*) es la distancia desde el frente de la lente al objeto bajo inspección [10].

2.3.4 Campo de visión

El campo de visión (FOV, por sus siglas en inglés: *field of view*) es el área visible de un objeto bajo inspección. Es la porción del objeto que llena el sensor de la cámara [10].

2.3.5 Campo de visión angular

El campo de visión angular (AFOV, por sus siglas en inglés: *angular field of view*) se expresa en grados [11] y se puede calcular mediante la Ecuación 1 que tiene como parámetros la distancia de trabajo WD y el campo de visión FOV, ambos descritos en las secciones 2.3.3 y 2.3.4, respectivamente.

$$AFOV = 2 \left(\tan^{-1} \left(\frac{FOV}{2 \times WD} \right) \right) \quad (1)$$

2.3.6 Tamaño del sensor

El tamaño del sensor (en inglés: *sensor size*) es el tamaño del área activa del sensor de una cámara que, por lo general, se especifica con la dimensión horizontal. Este parámetro es importante para determinar el aumento apropiado del lente requerido para obtener el campo de visión óptimo [10].

El tamaño del sensor se puede calcular directamente utilizando el tamaño del pixel y el número de pixeles activos, mediante la Ecuación 2, ya sea para el eje horizontal o el eje vertical [12]:

$$Tamaño\ del\ sensor = \frac{(Tamaño\ del\ pixel(mm)) \times (No.\ de\ pixeles\ activos)}{1000\ \mu m/mm} \quad (2)$$

2.3.7 Resolución de la imagen

La resolución es la medida de la habilidad de un sistema de imágenes para reproducir los detalles de un objeto, la cual puede ser influenciada por otros factores tales como el tipo de iluminación, el tamaño del pixel del sensor y la capacidad del sistema de lentes; mientras más pequeño sea el detalle del objeto, mayor será la resolución requerida [12].

La Figura 4 muestra un ejemplo del límite de resolución de una cámara, donde el objeto a observar tiene un par de cuadros sobre un fondo blanco. En la Figura 4(a) la resolución del sensor no es suficiente para separar ambos cuadros con un pixel intermedio, por lo que en la imagen resultante se muestra un rectángulo con área mayor, mientras que en la Figura 4(b) si existe al menos el espacio de un pixel, por lo que en la imagen resultante si se distinguen los dos cuadros; esta distancia mínima representa el límite de resolución del sistema [12].

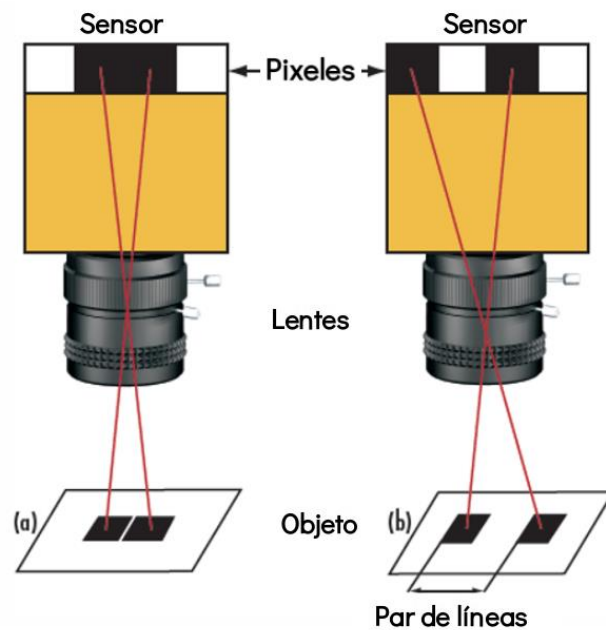


Figura 4. Límite de resolución en una cámara [10]

La resolución del sensor, también conocida como resolución espacial de la imagen del sistema, se calcula mediante la Ecuación 3 [12]:

$$\begin{aligned} \text{Resolución del sensor (lp / mm)} = \\ \text{Resolución espacial de la imagen (lp / mm)} = \frac{1000 \mu\text{m/mm}}{2 \times \text{Tamaño del pixel } (\mu\text{m})} \end{aligned} \quad (3)$$

Una medida sencilla de la resolución del sensor es el número de píxeles por milímetro [6]. Como estándar en la industria, la resolución se especifica en términos de la resolución horizontal, la cual mantiene una relación entre el ancho y alto. Un inconveniente que se puede presentar en la captura de la imagen es el efecto de viñeta, donde ésta puede tener un oscurecimiento hacia las orillas debido a la capacidad del lente de soportar algunos tamaños de sensores [6].

2.3.8 Profundidad de color

La profundidad de color (*bit depth*) es la cantidad de información que el sensor de la cámara puede generar; mientras mayor es la profundidad mayor será la cantidad de colores a utilizar [12]. Cada pixel en una imagen en escala de grises es de 8 bits, pudiendo tener 256 niveles de gris; las imágenes a color descritas en la Sección 5.1 tienen una profundidad de 24 bits. Una imagen con profundidad de 36 bits puede generar más de 68 billones de colores [12].

2.3.9 Apertura

La apertura en el sistema de lentes (conocida como número f) consiste en un diafragma ajustable que permite controlar la cantidad de luz que entrará [8]. A mayor valor de f menor será el valor de apertura.

2.3.10 Longitud focal del lente

Es la distancia entre el lente y el plano de imagen en el sensor de la cámara [11], el cual se puede calcular mediante la Ecuación 4.

$$F = \frac{1}{\left[\frac{2}{\text{Tamaño horizontal del sensor}} \times \tan\left(\frac{FOV}{2}\right) \right]} \quad (4)$$

El sistema de lentes utilizado por la cámara Nikon modelo D3400 es el AF-P DX NIKKOR 18 – 55 mm f/3.5 – 5.6G VR. De este valor se obtiene que el rango de ajuste es de 18 a 55 mm en su longitud focal y la apertura máxima puede ajustarse desde 3.5 hasta 5.6. La Tabla 2 muestra los valores de la longitud focal y su respectiva apertura máxima y mínima [13]:

Tabla 2: Longitud focal y aperturas máxima y mínima de la cámara Nikon D3400

Longitud focal	18 mm	24 mm	35 mm	45 mm	55 mm
Apertura máxima	f/3.5	f/3.8	f/4.5	f/5	f/5.6
Apertura mínima	f/22	f/25	f/29	f/32	f/36

2.3.11 Velocidad de obturación

La velocidad de obturación (en inglés: *shutter speed*) controla el tiempo de apertura del diafragma de la cámara, de manera que para una apertura mayor el tiempo de apertura requerido será menor [8]. La velocidad de obturación de una cámara *DSLR* (lentes monoculares reflex digitales, en inglés: *digital single-lens reflex*) normalmente varía en el rango de 1/4,000 de segundo a 30 segundos. Los

brillos no deseados se pueden controlar reduciendo el nivel de iluminación, o incrementando la velocidad del obturador [6].

2.3.12 Profundidad de campo

Los cambios en el tamaño de la apertura afectan la nitidez de la imagen. A menor apertura, el área de nitidez en frente y detrás del punto de enfoque se vuelve mayor. Esta área de nitidez se conoce como profundidad de campo [12]. Para una apertura pequeña (como $f/11$ o $f/16$) la profundidad de campo es mayor, donde los objetos en el fondo y frente se encontrarán enfocados [12]. Para una apertura mayor (como $f/2$ o $f/4$) la profundidad de campo es menor, donde los objetos cercanos a la distancia focal estarán enfocados, pero los objetos al frente y al fondo tenderán a estar desenfocados [12].

2.3.13 Velocidad de fotogramas

La velocidad de fotogramas (en inglés: *frame rate*) se refiere a la cantidad de cuadros completos de imagen tomados por segundo [6].

2.3.14 Resolución espacial del objeto (Aumento primario)

Para poder determinar el punto de resolución absoluto mínimo que puede ser visto en un objeto se necesita calcular la relación del campo de visión con el tamaño del sensor. Esta relación se conoce como el aumento primario (PMAG) del sistema [14] y se muestra en la Ecuación 5.

$$PMAG = \frac{\text{Tamaño del sensor}}{FOV}$$

(5)

La relación PMAG nos permite escalar la resolución espacial de la imagen, para poder deducir la resolución del objeto con la Ecuación 6 [14].

$$\text{Resolución espacial del objeto (lp/mm)} = \text{Resolución espacial de la imagen (lp/mm)} \times \text{PMAG} \quad (6)$$

Al desarrollar una aplicación, el requerimiento de resolución de un sistema no se presenta en *lp/mm*, sino más bien en micras (μm) o fracciones de pulgada [14]. La conversión se puede realizar mediante las Ecuaciones 7 u 8 [14]:

$$\text{Resolución espacial del objeto } (\mu\text{m}) = \frac{1000 \mu\text{m/mm}}{2 \times \text{Resolución espacial del objeto (lp/mm)}} \quad (7)$$

$$\text{Resolución espacial del objeto } (\mu\text{m}) = \frac{\text{Tamaño del pixel } (\mu\text{m})}{\text{PMAG del sistema}} \quad (8)$$

2.4 Iluminación

La iluminación se utiliza para iluminar un objeto o área y asegurar su visibilidad en aplicaciones de captura de imágenes [4]. Existen varios tipos de fuentes de luz incluyendo LED, fibra óptica y fluorescente, que se ajustan de distintas formas para cumplir los requerimientos de iluminación del sistema de inspección [4]. La Figura 5 muestra algunos ejemplos de iluminación.



Figura 5. Distintos tipos de iluminación [4]

Se debe poner especial énfasis en el diseño de la iluminación del sistema para mejorar los detalles de interés en las imágenes capturadas. El sistema será más robusto y confiable y dependerá en menor medida de los algoritmos de procesamiento [2]. El contraste entre superficies de distintos materiales se puede mejorar al hacer uso de efectos físicos, por ejemplo, las partes plásticas en una tarjeta electrónica bajo la iluminación ultravioleta pueden verse brillantes contra las partes metálicas debido a la fluorescencia. En otros casos la luz polarizada puede ser apropiada para mejorar el contraste [2].

2.4.1 Iluminación LED

La tecnología LED se utiliza para proveer iluminación a varias aplicaciones de sistemas de imágenes y ópticos. Existen diversos tipos de iluminación como luz de fondo (en inglés: *backlight*), luz concentrada (en inglés: *spotlight*), anillos de luz (en inglés: *ring lights*), luces difusas (en inglés: *diffuse lights*) y luces en línea (en inglés: *line lights*) que utilizan un arreglo de LEDs para producir una iluminación intensa y uniforme sobre el área u objeto a iluminar [15]; precisamente éste es el tipo de iluminación con que cuenta el sistema prototipo para la captura de imágenes. Una ventaja de la iluminación LED es su larga longevidad.

2.4.2 Iluminación por fibra óptica

La tecnología de fibra óptica se utiliza para proveer una luz intensa y fría en diversas aplicaciones de iluminación. Por lo general consiste en iluminadores de fibra óptica integrados con uno o más guías de luces que dirigen la luz hacia la aplicación específica. Los adaptadores más comunes son las luces en forma de anillo y las luces de fondo [16].

2.4.3 Iluminación fluorescente

La tecnología de iluminación mediante luz fluorescente es muy utilizada para varias aplicaciones ópticas y de imágenes, tales como la espectrometría y la inspección. La luz fluorescente consiste en un rango de productos de iluminación, como luz en línea, luz de fondo y luz en forma de anillo, que emiten una luz brillante y distribuida en forma uniforme. Dada su uniformidad es ideal para iluminar objetos oscuros o con áreas sombreadas [17].

2.5 Procesamiento y análisis de imágenes digitales

2.5.1 Espacios de color

El ojo humano es capaz de distinguir cientos de miles de colores gracias a los tres tipos de células foto-receptoras (conos) que responden a la radiación incidente [18]. Dicha percepción puede traducirse en tres componentes numéricos conocidos como primarios.

Los métodos para especificar el color se conocen como espacios de color o modelos de color [18] y su utilización para representar imágenes depende de la aplicación [18]. Algunos espacios de color son RGB, CIE XYZ, CIE $L^*a^*b^*$, CIE $L^*u^*v^*$, YCrCb, HSV, HLS, Bayer [18]. A continuación, se presentan los espacios de color utilizados en la tesis, así como sus características:

- RGB. Es un modelo aditivo, donde cada punto o pixel de la imagen consiste en tres canales independientes: rojo, verde y azul (RGB, por sus siglas en inglés: *red, green, and blue*) y un cuarto canal opcional para la transparencia, conocido como canal alfa [18]. RGB es uno de los espacios de color más utilizados pues emula los tres tipos de receptores del ojo humano. En este trabajo también se utiliza la notación BGR usada en *OpenCV* para este espacio de color [19], la cual presenta en distinto orden los canales de la imagen.
- Escala de grises. En este modelo cada pixel se representa con el valor de la información de intensidad, formando una imagen con distintos tonos de gris [18].
- CIE $L^*a^*b^*$. Es el espacio de color más completo especificado por la Comisión Internacional sobre Iluminación (CIE, por sus siglas en francés: *Commission Internationale de L'Eclairage*), creado para ser independiente de cualquier dispositivo para ser utilizado como una referencia [18]. Este modelo es capaz de describir los colores visibles a la vista humana. El canal L^* representa la luminosidad del color, el canal a^* describe una gama de colores entre el magenta y el verde, y el canal b^* representa una gama de colores entre el amarillo y el azul [18] [20]; en la Figura 6 se muestra una representación de este modelo.

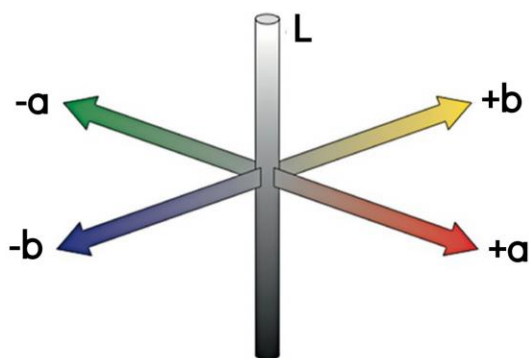


Figura 6. Una ilustración de los tres canales en el espacio de color CIE $L^*a^*b^*$ [20]

2.5.2 Calibración de cámaras digitales

Las cámaras fotográficas introducen distorsión a las imágenes debido a su propio diseño, principalmente las de tipo radial y tangencial; en el primer caso, las líneas rectas aparecerán curvas conforme el objeto se aleja del centro de la imagen; mientras que en el segundo caso algunas áreas pueden parecer más cercanas de lo que están, esto debido a la desalineación paralela entre el lente y el plano de la imagen [21]. En la Figura 7 se puede observar el efecto de la distorsión radial, donde con líneas rojas se marcan los extremos del cuadrículado, pero los bordes de este no siguen la línea recta debido a la distorsión de la cámara y el lente utilizado.

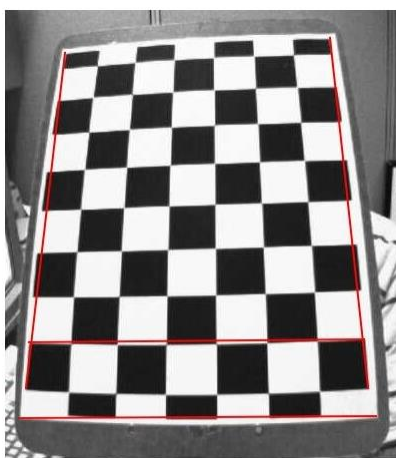


Figura 7. Ejemplo de distorsión radial [21]

Para realizar una calibración a la cámara mediante software se requiere de varias imágenes (alrededor de 10), de cinco parámetros conocidos como coeficientes de distorsión (k_1, k_2, p_1, p_2 y k_3), así como los parámetros intrínsecos (como distancia focal y centros ópticos) y extrínsecos (como vectores de rotación y traslación) de la cámara [21]. El algoritmo de calibración realiza una búsqueda de esquinas para identificar patrones similares a un tablero de ajedrez (ver Figura 8) mediante las funciones *findChessboardCorners*, *calibrateCamera*

y *getOptimalNewCameraMatrix* de *OpenCV* [21] para luego ejecutar una función de re-mapeo de los coeficientes de distorsión de la imagen para eliminar dicha distorsión (ver Figura 9) mediante las funciones *undistort* y *remap* [21].

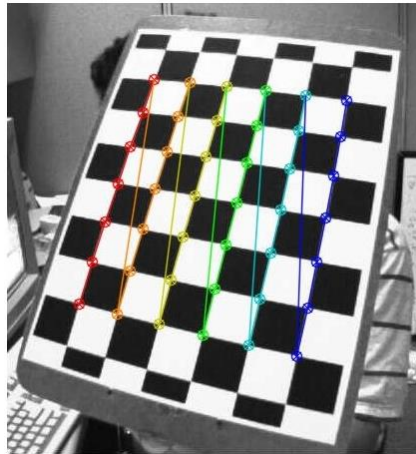


Figura 8. Imagen con patrones de calibración [21]



Figura 9. Imagen corregida mediante la calibración [21]

2.5.3 Filtrado de imágenes

Un filtrado es un algoritmo que se aplica a una imagen origen para generar una imagen destino, mediante cálculos realizados para cada pixel individual tomando en cuenta la información de los pixeles que se encuentran en un área alrededor del mismo [22]. El modelo que define el tamaño de dicha área, así

como la combinación de sus elementos para calcular el nuevo valor del pixel central (también conocido como ancla) se conoce como filtro o *kernel* [22]. El tamaño del *kernel* es pequeño (respecto al tamaño de la imagen) y por lo general tiene forma cuadrada y se expresa en valores pares como 3×3 , 5×5 , etc. [22].

2.5.4 Agudizamiento de la imagen

Para el agudizamiento de la imagen (en inglés: *sharpening*) se utilizan filtros que resaltan los bordes y otros detalles finos en la imagen; éstos se basan en derivadas de primer y segundo orden [23]. La primera derivada de la imagen calcula una aproximación del gradiente de intensidad, mientras que la segunda derivada define la divergencia de este gradiente. Dado que el procesamiento de imágenes digitales trabaja con cantidades discretas (intensidades de los píxeles), las versiones discretas de estas derivadas se utilizan para agudizar los detalles de las imágenes [23].

2.5.5 Detección de contornos

Las derivadas de primer orden producen contornos más gruesos en la imagen y se usan ampliamente para extraer contornos, mientras que las derivadas de segundo orden se utilizan para resaltar la imagen debido a su mejor respuesta ante detalles finos. Dos operadores populares para obtener las derivadas son Sobel y Laplaciano [23]. Por medio del proceso de agudizamiento se pueden obtener los bordes de la tarjeta electrónica bajo inspección, así como los bordes de los objetos que la componen.

2.5.6 Suavizado de la imagen

El suavizado (en inglés: *smoothing* o *blurring*) es una operación de uso frecuente para reducir la cantidad de ruido en una imagen mediante la aplicación de

filtros lineales [23] considerando los píxeles vecinos de cada pixel. Los filtros de suavizado más comunes son el mediano para eliminar ruido tipo sal y pimienta, Gaussiano como preparación para la detección de contornos y el bilateral para suavizar una imagen sin alterar los contornos muy marcados [23].

2.5.7 Circunvolución

La circunvolución (en inglés: *convolution*) es el proceso matemático de aplicar una operación a cada pixel para cambiar su valor utilizando la matriz del filtro o *kernel* [24]. Para cada pixel en la imagen se toma el *kernel* y se superpone de manera que el centro del *kernel* coincida con el pixel bajo consideración, entonces se multiplica cada valor de la matriz del *kernel* con los valores correspondientes en la imagen, para luego sumarlos. Este nuevo valor es el que se sustituye en la posición del pixel para generar la nueva imagen filtrada [24].

Dependiendo de los valores en el *kernel*, se pueden realizar distintas funciones tales como difuminado (en inglés: *blurring*) y detección de contornos (en inglés: *edges*), entre otros. La Figura 10 nos muestra una imagen y un *kernel* con dimensión de 3×3 [24].

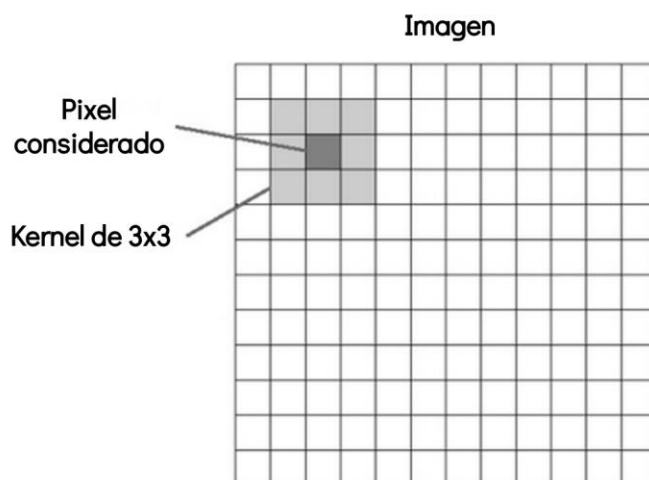


Figura 10. Imagen de ejemplo con un *kernel* de 3×3 píxeles [24]

En la Figura 11 se muestra un ejemplo de detección de contornos [24], donde el panel de la izquierda contiene la imagen original y el panel de la derecha contiene los contornos detectados.

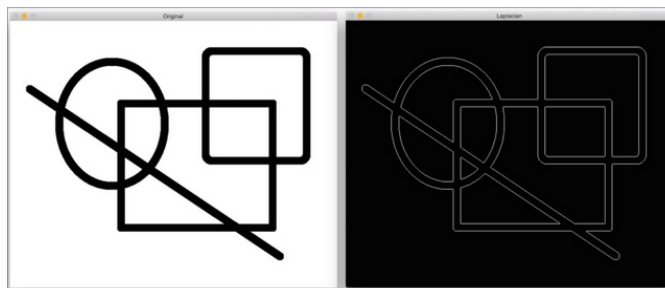


Figura 11. Ejemplo de detección de contornos [24]

Un *kernel* de dimensión 3×3 que se puede utilizar para difuminar una imagen en el proceso de circunvolución se presenta en la Figura 12 [24]. Este *kernel* obtiene el promedio del valor de intensidad de los píxeles en una vecindad de 3×3 .

$$L = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 12. *Kernel* para difuminado [24]

El filtro Sobel (de dimensión 3×3) se utiliza para detectar contornos y se compone del par de *kernels* mostrados en la Figura 13, los cuales se aplican para detectar contornos horizontales y verticales respectivamente [24].

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad S_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 13. *Kernels* para filtro Sobel [24]

2.5.8 Operaciones morfológicas

Las operaciones morfológicas procesan imágenes de acuerdo con formas conocidas como elementos estructurales, los cuales pueden ser en forma de rectángulo, elipse o cruz, y se aplican a dichas imágenes considerando los píxeles vecinos de cada píxel [23]. Las dos operaciones principales son dilatación, la cual agrega píxeles al contorno de los objetos en una imagen, y erosión, que remueve píxeles del contorno de los objetos [23], tal como se muestra en la Figura 14, donde se utilizaron elementos estructurales de forma rectangular.

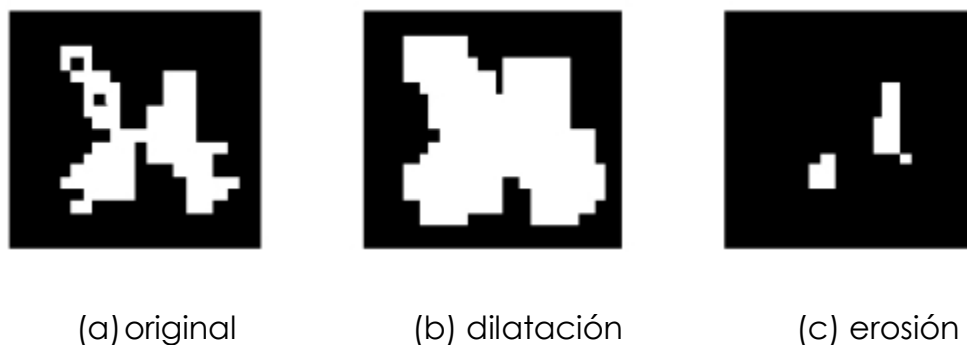


Figura 14. Un ejemplo de dilatación y erosión [23]

2.5.9 Transformaciones geométricas

Las transformaciones geométricas no modifican el contenido de la imagen sino la posición de sus píxeles dentro de la matriz [23]. Las transformaciones más comunes son las afines, donde los puntos ordenados en una línea de referencia inicial preservan la misma relación después de la transformación, que puede ser cambio de escala, traslación, rotación, oblicuidad y reflejo. Las transformaciones de perspectiva requieren de una matriz de transformación de 3×3 de las coordenadas de cuatro puntos en la imagen original y sus coordenadas correspondientes en la imagen resultante; en este caso, las líneas rectas permanecen rectas, pero las proporciones de ubicación de sus píxeles cambian

[23]. Las transformaciones geométricas se utilizan, por ejemplo, en la calibración de cámaras digitales descrita previamente en la Sección 2.5.2.

2.5.10 Asignación de intensidad mediante operaciones locales

Se pueden utilizar diversas técnicas para modificar el valor de intensidad de los píxeles de manera individual a lo cual se conoce como operaciones locales, para lo cual es común considerar el valor de intensidad de los píxeles a su alrededor.

Mediante la asignación de distintos pesos para cada píxel se pueden lograr varios efectos, por ejemplo, el resaltado de una imagen (en inglés: *sharpening*) se logra al sustraer el valor de los píxeles vecinos para incrementar el valor del píxel en el punto central [25]. El difuminado (en inglés: *blurring*) se logra al tomar el promedio de todos los píxeles vecinos, donde todos los valores en la matriz de convolución suman el valor de 1 [25].

Estos algoritmos de operaciones locales se conocen como *convolución espacial*, para lo cual se utilizan áreas vecinas de distintos tamaños, como matrices de 3×3 , 5×5 , etc. [25].

2.5.11 Segmentación basada en color

Cada espacio de color representa una imagen con valores numéricos de una característica específica medida en cada canal para cada píxel. Considerando estas características, es posible partir el espacio de color utilizando límites lineales (por ejemplo, planos en espacios tridimensionales y un espacio para cada canal) permitiendo clasificar cada píxel de acuerdo con la partición a la que pertenece, pudiendo seleccionar píxeles con características predefinidas. Este concepto puede utilizarse para segmentar ciertos objetos de interés en una imagen [18].

2.5.12 Extracción de características visuales

Las siguientes herramientas y algoritmos permiten extraer información de las imágenes para una mejor compresión y análisis.

- Histogramas de intensidad y color. Para una imagen en escala de grises, un histograma de intensidad consiste en la función de probabilidad de densidad para los distintos niveles de gris disponibles [22]. El histograma se puede modelar para cambiar los niveles de contraste, lo cual se conoce como ecualización del histograma [22]. Para una imagen de color se puede obtener un histograma para cada canal, o bien un histograma para cada subconjunto de colores representativos (aquellos agrupados en regiones con similitud en color). Es posible calcular el histograma de dos o más imágenes para luego compararlas y calcular un histograma conjunto, donde se puede obtener la correlación entre las imágenes [22].
- Histograma de gradientes orientados (HOG, por sus siglas en inglés: *histogram of oriented gradients*). Es un descriptor de características de imágenes donde las figuras locales y la apariencia de los objetos pueden describirse mediante la distribución de la dirección de los contornos. La imagen se divide en pequeñas regiones conectadas, dentro de las cuales un histograma de gradiente de direcciones es compilado para posteriormente ensamblar el descriptor mediante la concatenación de los diferentes histogramas [22].
- Momentos de una imagen. Son valores estadísticos calculados en la imagen que nos permiten analizarla en su conjunto. Por lo general, es recomendable extraer primero los contornos de los objetos para calcular los momentos de cada componente de manera independiente [24], tal como el centro de masa, centroide, eje principal, entre otros.

2.5.13 Substracción del fondo

En el caso estudiado en la tesis, el fondo es la superficie inamovible debajo de la tarjeta electrónica a inspeccionar. El proceso de substracción del fondo (en inglés: *background subtraction*) requiere primero aprender el modelo del fondo mediante una captura de imagen para posteriormente realizar una operación de substracción que permita obtener el objeto ubicado sobre la superficie [22]. Posteriormente, se distingue el fondo de los objetos de interés mediante un proceso de segmentación binaria por medio de un valor de umbral.

2.5.14 Ecualización de histograma de una imagen

La ecualización de un histograma es un método que mejora el contraste en una imagen, de manera que distribuye el rango de intensidad en forma uniforme [26]. En la Figura 15(a) se observa una imagen de referencia y en la Figura 15(b) su respectivo histograma, es decir, la distribución de intensidades. Después de aplicar la ecualización del histograma de la imagen, se obtiene la Figura 16(a) donde la imagen presenta un mejor contraste y la Figura 16(b) que presenta el histograma resultante donde se aprecia una distribución de las intensidades más uniforme.

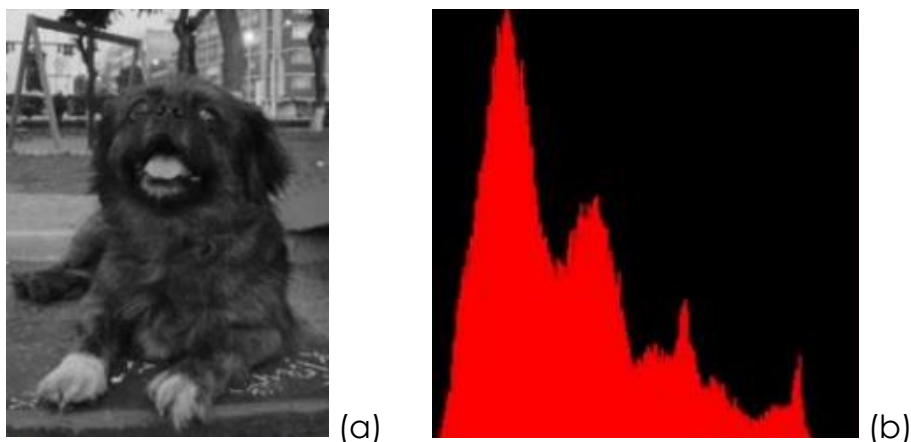


Figura 15. (a) Imagen con poco contraste y (b) su histograma [26]

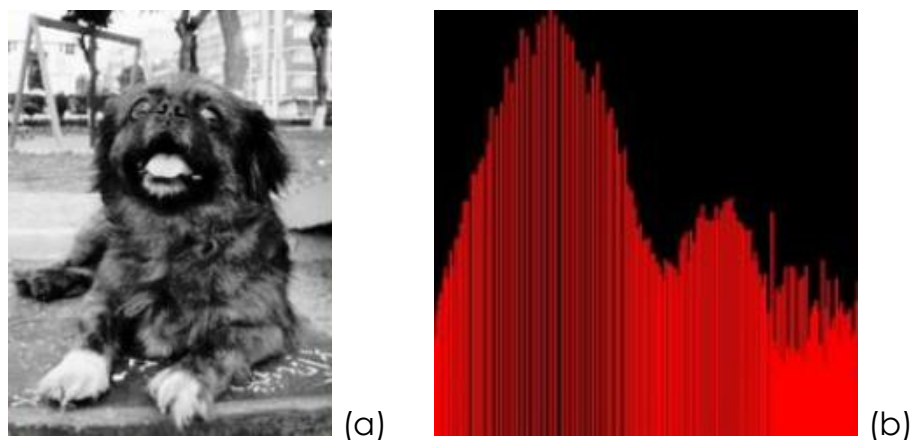


Figura 16. (a) Imagen con el contraste de su histograma ecualizado y (b) el histograma resultante [26]

La función *equalizeHist* de *OpenCV* [26] realiza la operación de ecualización del histograma de intensidades de una imagen.

2.6 Discusión

En el presente trabajo se propone un sistema de visión donde se aprovechan varios algoritmos para evaluar tanto el contraste del color, así como la intensidad de la imagen, con el objetivo de reconocer patrones que permiten hacer comparaciones tanto de color, contornos y sombras. Al combinar estos métodos se tiene la posibilidad de obtener mejores resultados en la búsqueda de fallas o defectos en las tarjetas electrónicas a inspeccionar.

En este capítulo se abordaron algunos temas como los parámetros ópticos de un sistema de adquisición de imágenes, la resolución de las imágenes, su profundidad de color y de campo, la apertura de los lentes, la distancia de trabajo y el campo de visión, con lo cual se comprende mejor las capacidades de un sistema afín. Otros temas desarrollados en este capítulo permiten entender los algoritmos que se describen en el Capítulo 4 del método propuesto, así como

su aplicación para obtener los resultados descritos en el Capítulo 5 de análisis experimental.

Dentro del procesamiento que se realiza a las imágenes en el sistema de visión propuesto, se requieren efectuar algunas operaciones, tales como el filtrado, agudizamiento y suavizado, considerando el *kernel* aplicado a una imagen mediante la circunvolución; la detección de contornos es clave en el algoritmo para el análisis de contornos. Las operaciones morfológicas como la dilatación y la erosión junto con otras técnicas, sirven de apoyo para resaltar la tarjeta electrónica (área de interés) sobre el fondo, mientras que las transformaciones geométricas afines, como la rotación y traslación, juegan un papel crítico en el registro de las imágenes.

El sistema prototipo de adquisición utilizado en el proyecto permite obtener las imágenes digitales de las tarjetas electrónicas tanto de referencia como de inspección bajo condiciones similares de iluminación y ubicación de las tarjetas.

En el método propuesto para el diseño de un sistema de inspección de tarjetas electrónicas que se describe en el Capítulo 4 se presentan tres algoritmos para la detección de diferencias entre las tarjetas electrónicas, basados en el análisis de colores, contornos y sombras en imágenes digitales. El primer algoritmo cubre el tema de espacios de color y la segmentación, el segundo algoritmo identifica las características de los contornos y en el tercer algoritmo se utilizan los histogramas de una imagen y su ecualización para resaltar las diferencias debido a sus sombras o a la falta de ellas. Posteriormente, en el Capítulo 5 se realizan pruebas de los algoritmos utilizando tarjetas con defectos para obtener una validación de sus resultados, lo que permite planear su utilización en un ambiente de manufactura.

CAPÍTULO 3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Este capítulo presenta el estudio del estado del arte sobre trabajos relevantes relacionados con los sistemas AOI y sistemas de captura de imágenes digitales.

3.1 Análisis de sombras en imágenes digitales

Una de las actividades en este trabajo es identificar los patrones de las sombras de los principales componentes en una tarjeta electrónica. Al revisar las técnicas disponibles en la literatura se encuentran procesos de eliminación de sombras que son de utilidad para identificar las áreas sombreadas de un ambiente en particular.

En 2003 Shiting & Hong presentaron un método para detección de contornos de sombras en imágenes, en el cual aplican un proceso de suavizado para después procesar el contorno mediante el algoritmo *Canny* y realizar el análisis de las sombras [27]. El algoritmo *Canny* [23] es quizá el algoritmo de detección de contornos en imágenes más utilizado hoy en día, el cual elimina ruido de la imagen para luego utilizar una derivada en dos dimensiones de la intensidad de la imagen y calcular un gradiente con dichos resultados [27], suprimiendo los puntos con valores cercanos a cero para resaltar los contornos. Otros algoritmos disponibles para la detección de contornos son LoG (por sus siglas en inglés: *Laplacian of Gaussian*), Prewitt, Roberts y Sobel [27].

La mayoría de estas técnicas se aplican en la fotografía aérea o satelital, donde el objetivo es identificar aspectos tan amplios como el terreno, caudales, poblaciones y detalles más puntuales como edificios y sus fachadas, casas, monumentos, autotransporte, e incluso personas; en dicho proceso se busca descartar las sombras de otros objetos, así como de las nubes, bajo condiciones de iluminación muy variada dado el huso horario. La aplicación de estas

técnicas se puede extender al ambiente de una estación de trabajo donde se inspeccionan tarjetas electrónicas con la ventaja de que las condiciones de iluminación y el estado estático de los objetos es controlado.

En 2012 expertos de Google propusieron una técnica para la eliminación de sombras en fotografía aérea por medio del análisis de imágenes con información intrínseca de la escena, básicamente de las superficies y la iluminación [28]. Con dicha técnica se pueden identificar patrones de texturas, tales como edificios, así como sombras tenues con regiones difusas, como sombras de nubes. La técnica está basada en las observaciones de que un cambio en la iluminación de la escena tiende a incrementar la entropía de las intensidades en las texturas, y de igual manera la presencia de texturas en la escena incrementa la entropía de la función de iluminación, separando la imagen en componentes de textura e iluminación. La Figura 17 muestra un ejemplo de esta técnica.

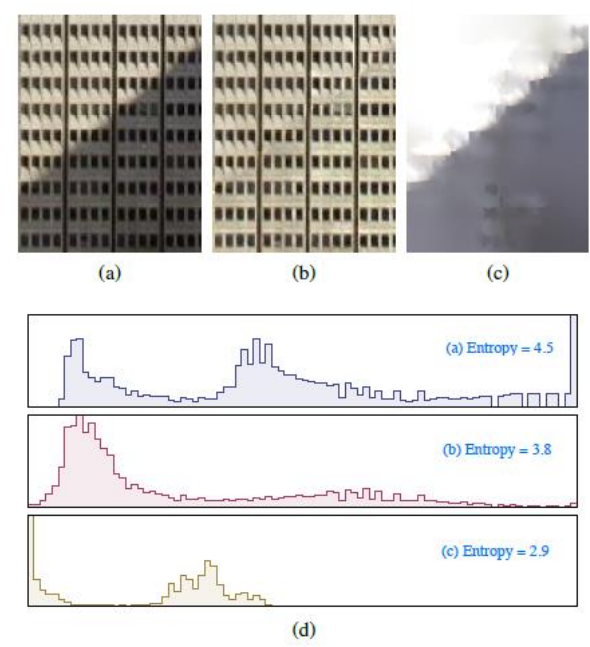


Figura 17. Ejemplo de modelo de eliminación de sombras y su entropía: (a) imagen original, (b) imagen con la sombra eliminada, (c) componente de iluminación y (d) histogramas y entropías de las imágenes a, b y c [29].

Las sombras creadas por los objetos en una imagen pueden proporcionar información útil sobre el objeto, sin embargo, también pueden crear problemas en las aplicaciones de visión por computadora, tales como la segmentación de los objetos de manera que la sombra de éstos se contabilice como objetos adicionales [30].

La detección de sombras se utiliza ampliamente para el reconocimiento de patrones y el procesamiento de imágenes. Por otro lado, la eliminación de sombras también juega un papel importante, por ejemplo, en las imágenes aéreas remotas de alta resolución, donde la ayuda de un clasificador entrenado como la máquina de vector de soporte (SVM, por sus siglas en inglés: *support vector machine*) puede mejorar el nivel de confianza para la correcta clasificación de las sombras [30].

El presente proyecto considera un algoritmo para el análisis de las sombras en los componentes instalados en una tarjeta electrónica, por lo que el valor de intensidad de cada pixel es crítico; como parte del análisis se verifica qué espacio de color resulta ser el más adecuado para realizar el procesamiento de la imagen.

3.2 Sistemas de inspección óptica automatizada

Actualmente, en los sistemas AOI se encuentra un enfoque muy amplio para la inspección visual automatizada en la industria de los semiconductores [31], en particular para la manufactura y producción de obleas (en inglés: *wafers*), pantallas de cristal líquido del tipo transistor de filme delgado (en inglés: *thin-film*) y diodos emisores de luz [31].

Por ejemplo, en la patente US 9,646,224 B2 se puede encontrar el planteamiento de un sistema de inspección óptica automatizada, que incluye un método de

procesamiento de imágenes, un dispositivo de procesamiento de imágenes y una máquina de inspección óptica automatizada [31]. El método de procesamiento de imágenes incluye un paso para determinar un área rectangular para la inspección de una imagen; el cálculo para la definición de una imagen de referencia, y para la imagen de un producto; un paso para comparar la imagen del producto con la definición de la imagen de referencia; así como un paso para seleccionar la imagen del producto que se desea inspeccionar [31]. En el presente trabajo se consideran algunos pasos similares, ya que se plantea capturar una imagen que sirve como referencia, seguido de la imagen del producto que se quiere validar, para proseguir con la inspección.

Una de las ventajas señaladas en la patente US 9,646,224 B2 [31] es que el procedimiento de procesamiento de la imagen es sencillo y conveniente al basarse solo en diferenciales de gris, representando una carga de procesamiento ligera. Una aplicación mencionada en esta patente es para la inspección de pantallas LCD (por sus siglas en inglés: *liquid crystal display*). Es importante recalcar que la aplicación que se busca crear en el presente trabajo también plantea utilizar un algoritmo para el análisis de color, dado que las tarjetas electrónicas a inspeccionar presentan una amplia gama de colores en sus componentes, resultando crítico el identificar cualquier diferencia; se entiende que la carga de procesamiento del sistema de cómputo se puede triplicar, pero es un requerimiento necesario y una de sus ventajas es lograr una mayor sensibilidad.

Por otro lado, en la patente US 9,401,313 B2 se documenta otro método de inspección óptica automatizada para una pluralidad de paquetes de semiconductores únicos dentro de una oblea, donde un patrón específico se puede formar para cada molde del semiconductor [28]. Mediante las imágenes de patrones adquiridas mediante un sistema AOI, se puede formar un estándar

de referencia que al compararse con imágenes nuevas se pueden detectar defectos. Las imágenes capturadas se convierten a imágenes binarias, especificando las pistas conductivas y no conductivas, marcando listados de coordenadas (x,y) ; y mediante algoritmos de expansión de píxeles se pueden identificar pistas que estén o no conectadas [28]. También, se utilizan imágenes CAD (por sus siglas en inglés: *computer-aided design*) para identificar patrones en escala de grises para comparar y detectar defectos, así como para la extracción de la geometría del diseño para detectar diferencias [28].

En el presente trabajo se contempla una imagen de referencia o patrón a ser comparado. Algunos de los algoritmos propuestos utilizan la expansión de píxeles para identificar componentes conectados. Sin embargo, no se contempla el uso de imágenes CAD para la extracción de geometrías, ya que se requeriría un diseño más complejo y tendría la dependencia de dichos archivos. En esta tesis se propone un diseño que pueda funcionar con una nueva tarjeta patrón y una o más tarjetas a inspeccionar en el momento.

3.3 Técnicas de inspección visual

La inspección visual automatizada es una técnica de procesamiento de imágenes para el control de calidad y automatización en una línea de producción [31]. Los algoritmos basados en visión que han sido adoptados en los sistemas de inspección visual incluyen métodos basados en proyecciones, en filtros, en aprendizaje, así como sistemas híbridos [31]. Para lograr una robustez y eficiencia se requiere de conocimiento interdisciplinario para diseñar sistemas de inspección novedosos, donde los múltiples tipos de defectos de varios productos pueden servir de referencia para mejoras en futuras implementaciones [31]. Algunas de las técnicas de inspección visual comúnmente utilizadas en los sistemas AOI incluyen:

- *Métodos de proyección*, donde se modela la correlación con diversas muestras de las cuales el sistema aprenderá y se determina un espacio más discriminativo para representar estas muestras. Después de repetir el proceso de proyección, la información redundante y el ruido se reducen para revelar la información oculta [31]. Algunos de estos métodos incluyen el análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés: *principal component analysis*), análisis discriminante lineal (LDA, por sus siglas en inglés: *linear discriminant analysis*) y el análisis de componente independiente (ICA, por sus siglas en inglés: *independent component analysis*) [31].
- *Métodos de filtrado*, que están siendo utilizados ampliamente en aplicaciones de procesamiento de señales para mejorar y restaurar imágenes mediante el uso de filtros pasa-bajos y pasa-altos, así como la transformación del dominio espacial al dominio de frecuencia mediante transformaciones de coseno discreto (DCT, por sus siglas en inglés: *discrete cosine transform*) y transformadas de Fourier [31].
- *Métodos de aprendizaje*, que se han desarrollado mediante el aprendizaje de máquinas y con algoritmos de reconocimiento de patrones y buscan coleccionar de forma automática reglas discriminativas para mejorar la exactitud de los resultados mediante el entrenamiento del sistema con muestras [31]. Algunos métodos de aprendizaje de máquina que han sido utilizados en tareas de inspección visual son: las redes neuronales artificiales (ANNs, por sus siglas en inglés: *artificial neuronal networks*), máquinas de vectores de soporte (SVMs, por sus siglas en inglés: *support vector machines*) y algoritmos genéricos (GAs, por sus siglas en inglés: *generic algorithms*), tal como el método para detectar variaciones en el brillo de pantallas de LCD conocido como factores de agrupamiento perceptivo [31].

- *Métodos híbridos*, diseñados cuando los requerimientos del sistema son complejos y requieren una combinación de varios tipos de técnicas para lograr llevar a cabo la inspección [31].
- *Algoritmos misceláneos*, los cuales no están clasificados en las categorías previas, tales como un método de inspección que combina el uso de archivos CAD para acelerar los cálculos y crear una imagen de referencia ideal [31].

El presente trabajo contempla un algoritmo basado en el análisis de contornos, otro algoritmo basado en el análisis de colores, así como un algoritmo para el análisis de sombras, donde todos ellos pretenden señalar las zonas de interés para la inspección visual; estos algoritmos se pueden considerar misceláneos e incluso híbridos de acuerdo con las categorías descritas en el anterior listado.

3.4 Análisis de color y resta de píxeles

La información de color y gradientes se puede utilizar con un enfoque jerárquico para sustraer el fondo de una imagen [32]. En este método se utilizan varias técnicas para la detección de objetos bajo diversas condiciones, a nivel pixel, a nivel región y a nivel de marco (para la detección en secuencias de video); esta técnica se puede utilizar en los sistemas de vigilancia automática, en donde se realiza un seguimiento de objetos o personas en movimiento al distinguirse de un fondo estático [32]. La substracción de color utiliza una mezcla del método de Gaussianas modificado para realizar una resta en el dominio de color, donde una mezcla de distribuciones K Gaussianas modela el color de cada pixel [32].

La resta de píxeles es una operación que toma dos imágenes de entrada y genera una tercera imagen de salida, donde los valores de los píxeles son básicamente la resta de los píxeles correspondientes de las imágenes de entrada [33]. Se puede utilizar la diferencia absoluta o la diferencia que incluye valores

negativos, en cuyo caso éstos últimos se pueden ajustar al valor de 0 que equivale al negro [33]. La resta de píxeles se utiliza para sustraer el fondo de una imagen para resaltar los objetos en primer plano para un mejor análisis; la resta de píxeles se utiliza también para detectar cambios entre las imágenes de entrada [33], por ejemplo, en el cambio de color cuando la resta se realiza para cada uno de los canales de una imagen en formato RGB.

3.5 Cálculo de contornos y análisis

Los contornos de figuras y objetos en una imagen proveen de información importante que puede utilizarse para describir y analizar los mismos, tal como el área, con la cual se pueden discriminar objetos según su tamaño [34]. La detección de contornos se puede utilizar junto con algoritmos para el análisis de formas que al combinarse con el valor de umbral se puede asegurar que los algoritmos de seguimiento de objetos utilicen correctamente la información de las figuras, así como los valores de color e intensidad de los píxeles [34].

Otra aplicación del uso de contornos es en la estimación de cajones de estacionamiento disponibles, mediante la substracción del fondo con un análisis de mapas de transitoriedad, donde se busca la intersección entre los contornos para determinar dónde y cuántos espacios vacíos están disponibles para los automóviles [35].

3.6 Discusión

En este trabajo se propone un sistema de visión simplificado de apoyo para los inspectores de calidad, los cuales tomarán la información del sistema como referencia para soportar su decisión sobre el resultado de la inspección. Para tal fin se considera la combinación de varios algoritmos para el análisis de colores,

contornos y sombras que complementen el proceso comparativo de las tarjetas electrónicas.

Para el diseño del sistema de visión se debe contemplar la precisión esperada, la cual se puede medir como un porcentaje de verificación de los defectos inspeccionados. Se estima que los porcentajes de verificación en un sistema AOI comercial fluctúa en los siguientes porcentajes [36]:

- 15% de defectos reales incorrectamente verificados
- 97% de fallas falsas verificadas correctamente

Con el sistema de visión propuesto se busca alcanzar una precisión similar a los sistemas AOI disponibles en el mercado. Dado que no se encontró información que permita evaluar y comparar la eficiencia de los tres algoritmos propuestos con trabajos previos, se espera que el análisis del sistema propuesto tenga un 15% en defectos reales incorrectamente verificados para cada uno de ellos, de acuerdo con el estimado de porcentajes de verificación en un sistema AOI [36].

Otro punto importante que considerar para el diseño del sistema de visión es su costo, que no debe limitarse solo al costo de adquisición, sino también al costo de mantenimiento de manera que dicha combinación resulte en un sistema más accesible. Al investigar datos de mercado, se encuentra que el costo estimado de un sistema AIO complejo [36] es de alrededor de *USD\$30,000* dólares, que implica una importante inversión.

El sistema de visión propuesto tendrá un costo mucho menor, al considerar componentes comerciales accesibles enfocados más a la parte de la inspección más que a una automatización, así como software de fuente abierta, pero muy en especial por el hecho de ser propietario del diseño y los algoritmos de funcionamiento, de manera que se tenga el control total sobre las mejoras e implementaciones futuras del sistema, evitando posibles limitaciones (como

software, hardware y funcionalidad) al depender de un proveedor de sistemas AOI.

En resumen, las ventajas planteadas del sistema de visión propuesto son:

- Precisión equiparable a la sección de inspección un sistema AOI comercial
- Costo más accesible que un sistema AOI comercial
- Control sobre el diseño y algoritmos del sistema

En el siguiente capítulo se muestra un ejercicio del cálculo de los parámetros para un sistema óptico de captura para imágenes digitales y se detallan los pasos de cada uno de los algoritmos considerados para la solución propuesta en esta tesis.

CAPÍTULO 4. MÉTODO PROPUESTO

Para dar soporte al proceso de inspección de tarjetas electrónicas que se realiza en forma manual en la compañía, en esta tesis se propone un sistema de inspección óptica que, a partir del análisis de una serie de imágenes digitales, le proporciona información adicional al operador para que pueda tomar una mejor decisión sobre la calidad de cada tarjeta que es inspeccionada, reduciendo además la fatiga visual de la operación actual.

4.1 Esquema general del método propuesto

La Figura 18 muestra los bloques que componen el esquema general del procesamiento y análisis de las imágenes en el sistema de inspección propuesto.

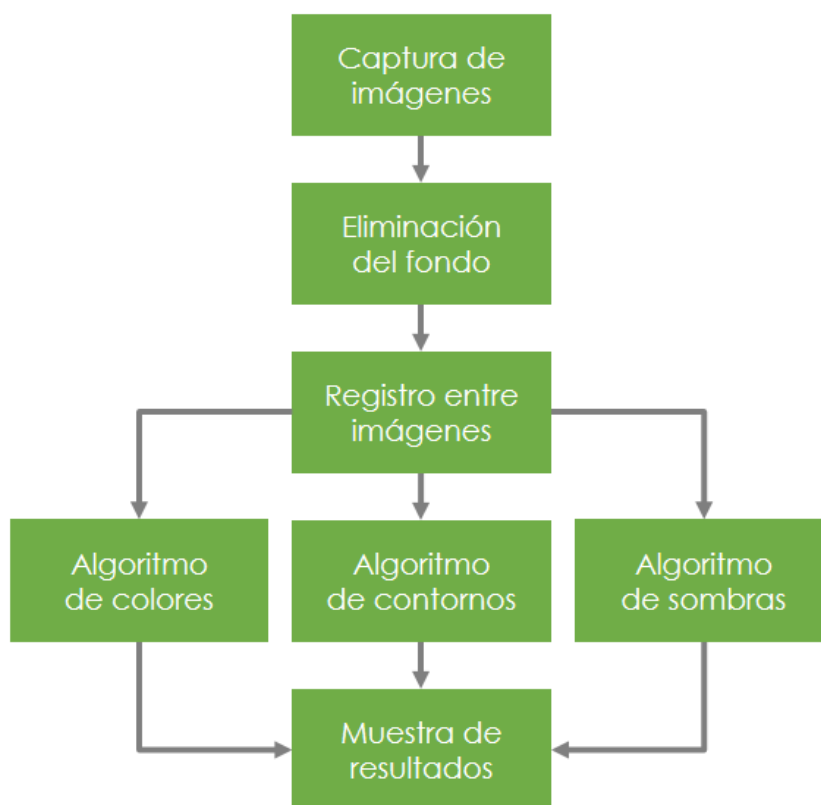
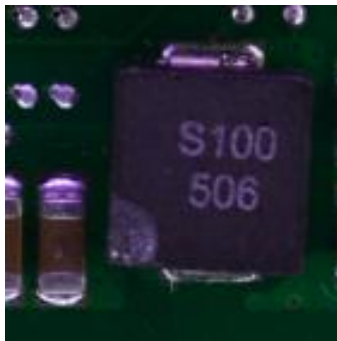
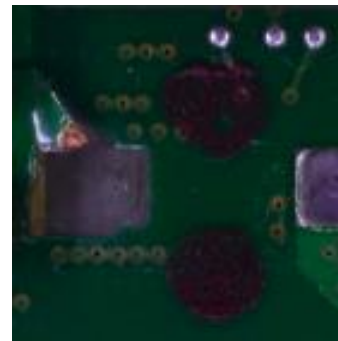


Figura 18. Esquema del procesamiento y análisis de imágenes

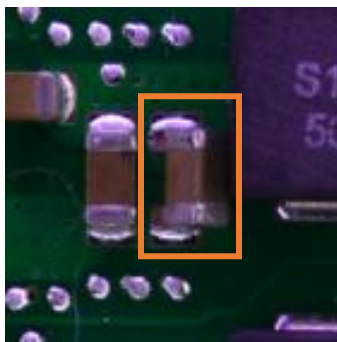
El sistema ayuda en la detección de anomalías en los componentes y la superficie de la tarjeta electrónica bajo inspección mediante el análisis comparativo contra una tarjeta de referencia; para lo cual se proponen algoritmos que analizan elementos como los colores, los contornos de los componentes y sus sombras. En dicho análisis se pueden identificar fallas o defectos en una tarjeta electrónica, tal como los que se muestran en la Figura 19.



(a) Componente fracturado



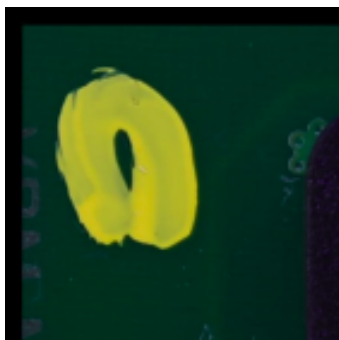
(b) Componente faltante



(c) Componente dañado



(d) Rayón en la superficie



(e) Marcas en la tarjeta



(f) Componente mal instalado

Figura 19. Ejemplos de fallas o defectos en las tarjetas electrónicas

En el resto de este capítulo se detalla el método propuesto y los algoritmos utilizados.

4.2 Sistema prototipo para la adquisición de imágenes digitales

Para llevar a cabo el método propuesto de inspección se utilizó un sistema prototipo para la iluminación y captura de imágenes digitales. Este sistema está en proceso de ser patentado, por lo que en el presente trabajo se consideran las imágenes capturadas sin entrar en el detalle del procedimiento llevado a cabo.

Antes de describir el procedimiento para la eliminación del fondo de las imágenes, la Sección 4.3 detalla varias consideraciones para el sistema óptico de la cámara digital.

4.3 Cálculo de parámetros para un sistema óptico de captura de imágenes digitales

En esta sección se presenta un ejercicio del cálculo de los parámetros de un sistema óptico para la captura de imágenes digitales, el cual se puede replicar

para aplicaciones similares. En la Figura 20 se muestra la distancia de la cámara digital por encima del objeto cuya imagen se va a capturar.

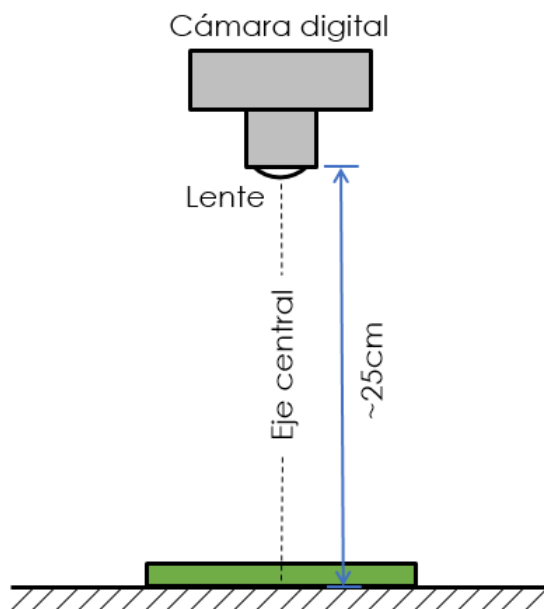


Figura 20. Distancia de la cámara digital al objeto

La cámara digital [37] se coloca de manera que su lente enfoque sobre el eje central de la tarjeta. El sistema de lentes de la cámara se ajusta en la longitud focal menor, 18 mm, con la cual se puede tener una apertura máxima de $f/3.5$, o mínima de $f/22$, tal como se especifica en la Tabla 2 de la Sección 2.3.10. Con esta configuración la distancia de enfoque mínimo se mantiene en los 25 cm sobre la tarjeta a inspeccionar para una correcta definición. La colocación de la cámara en esta posición permite captar un área de cerca de $27 \times 18 \text{ cm}^2$, lo que equivale alrededor de 486 cm^2 , como se muestra en la Figura 21. La relación de la imagen es 1.5, es decir, el ancho es 1.5 veces el alto. Se realizaron varios cálculos y pruebas para determinar las dimensiones presentadas en este ejercicio.

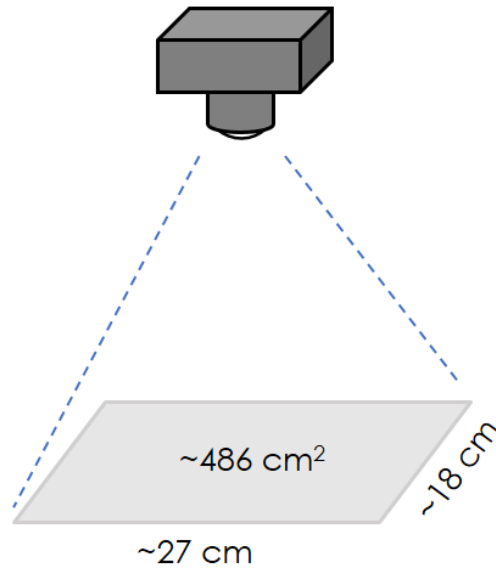


Figura 21. Área captada por la cámara digital en la posición establecida

4.3.1 Cálculo de la resolución y amplificación para el sensor de la cámara

Los parámetros de fábrica del sensor utilizado en la cámara Nikon D3400 [9] para este ejercicio son:

- Tamaño del pixel = $3.917 \mu m \times 3.9 \mu m$
- Número de pixeles (H x V) = $6,000 \times 4,000$
- FOV deseado (Horizontal) = 270 mm

Sustituyendo los valores de estos parámetros en la Ecuación 6 presentada en la Sección 2.3, se obtiene la resolución espacial de la imagen en la Ecuación 9; de igual manera, sustituyendo los valores de estos parámetros en la Ecuación 2 presentada en la Sección 2.3, se obtiene el tamaño del sensor en forma horizontal con la Ecuación 10 y vertical con la Ecuación 11.

$$\text{Resolución espacial de la imagen} \left(\frac{lp}{mm} \right) = \frac{1000 \frac{\mu m}{mm}}{2 \times 3.917 (\mu m)} \approx 127 \frac{lp}{mm}$$

(9)

$$\text{Tamaño horizontal del sensor (mm)} = \frac{(3.917 \mu\text{m}) \times (6000)}{1000 \frac{\mu\text{m}}{\text{mm}}} = \mathbf{23.5 \text{ mm}}$$

(10)

$$\text{Tamaño vertical del sensor (mm)} = \frac{(3.9 \mu\text{m}) \times (4000)}{1000 \frac{\mu\text{m}}{\text{mm}}} = \mathbf{15.6 \text{ mm}}$$

(11)

Sustituyendo el tamaño horizontal del sensor y el campo de visión (FOV) en la Ecuación 5 presentada en la Sección 2.3, se obtiene el valor del aumento primario (PMAG) en la Ecuación 12, que al dividir el tamaño del pixel en la Ecuación 6 obtiene la resolución espacial del objeto en la Ecuación 13.

$$PMAG = \frac{23.5 \text{ mm}}{270 \text{ mm}} = \mathbf{0.0870}$$

(12)

$$\text{Resolución espacial del objeto} = \frac{3.917 \mu\text{m}}{0.0870} \approx \mathbf{45 \mu\text{m}}$$

(13)

4.3.2 Cálculo de la longitud focal y el campo de visión angular

Considerando el tamaño del sensor, el campo de visión y la distancia de trabajo se pueden determinar la longitud focal requerida y el campo de visión angular del objeto a inspeccionar, lo que permite realizar una aproximación teórica para elegir el sistema de lentes apropiado [11].

Sustituyendo los valores de estos parámetros en las Ecuaciones 4 y 1 presentadas en la Sección 2.3, se obtiene la longitud focal (F) en la Ecuación 14 y el campo de visión angular (AFOV) en la Ecuación 15.

$$F = \frac{1}{\left[\frac{2}{23.5 \text{ mm}} \times \tan\left(\frac{270}{2}\right) \right]} = \mathbf{34.40 \text{ mm}}$$

(14)

$$AFOV = 2 \left(\tan^{-1}\left(\frac{270}{2 \times 250}\right) \right) = 0.99 \text{ rad} = \mathbf{56.74 \text{ grados}}$$

(15)

Los cálculos muestran que la longitud focal del lente del sistema prototipo puede soportar la distancia de trabajo con un enfoque adecuado, ya que el rango del lente es de 18 a 55 mm, teniendo un campo de visión angular de alrededor de 56 grados.

Los parámetros calculados para el sistema óptico se deben considerar dentro de cualquier implementación, ya que permiten entender las capacidades y limitaciones del sistema durante la captura de las imágenes digitales.

4.4 Software utilizado para el desarrollo del proyecto

La implementación de los algoritmos para el sistema de inspección se realizó utilizando el siguiente software de fuente abierta:

- Sistema operativo Linux para CPU Intel o AMD [38].
- Librería de visión por computadora (en inglés: *Open Source Computer Vision Library*) conocida como *OpenCV* [39].

- Ambiente de desarrollo Eclipse (IDE, por sus siglas en inglés: *integrated development environment*) para lenguajes de programación como C++ y Python [40].

4.5 Procedimiento para la eliminación del fondo de la imagen

Durante el procedimiento de captura de imágenes éstas pueden presentar zonas irrelevantes, tal como la superficie donde se coloca la tarjeta electrónica. El procedimiento de eliminación de fondo consiste en detectar dichas zonas y marcarlas en color negro para dejar solo el área de interés. A continuación, se presentan los pasos de este procedimiento [41] [42] y en la Sección 5.2 se muestran las imágenes relacionadas a estos pasos.

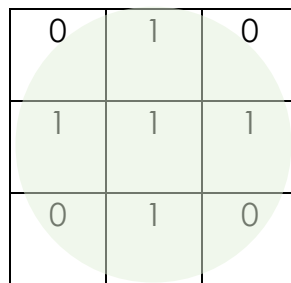
1. Disminuir intensidad de las sombras. Se carga una imagen a la vez (imagen I), la cual es convertida del espacio de color BGR (I_{BGR}) a HSV (I_{HSV}); se separan sus tres canales en I_H , I_S e I_V y se aplica una operación de valor de umbral (*threshold*) [43] utilizando un valor de 200 para el canal de intensidad número 2 (I_V). Este procedimiento permite minimizar las sombras presentes en la imagen. Los tres canales se vuelven a unir en una sola imagen I_{HSV} , la cual se convierte del espacio de color HSV a la imagen I_{BGR} en el espacio de color BGR.

2. Conversión a escala de grises y normalización. La imagen I_{BGR} se convierte del espacio de color BGR a la imagen I_{GRAY} en escala de grises, quedando la información de intensidad en un solo canal, el cual se normaliza para el rango de 0 a 255.

3. Detección de contornos. A la imagen I_{GRAY} se le aplica la función *GaussianBlur* de *OpenCV* con un *kernel* de tamaño 3×3 para obtener la imagen I_{BLUR} . Enseguida, se aplica el detector de contornos Sobel en dos pasos, primero en el sentido de las columnas y luego en el sentido de las filas (I_{COL} , I_{ROW});

posteriormente, se realiza un ajuste de escala de los valores resultantes y se combina el resultado de ambos pasos aplicando una combinación del canal alfa con un 50% para cada uno (I_{MERGE}). Luego, se aplica un valor de umbral binario, donde todo valor por debajo de 25 toma el valor de 0, eliminando la información que se pretende discriminar, obteniendo la imagen I_{THRES} . Una opción alterna para la detección de contornos es aplicar el operador *Canny* utilizando, como recomendación, un *kernel* de 5×5 pixeles de tamaño.

4. Dilatación. Se realiza una dilatación de los contornos detectados en la imagen I_{THRES} utilizando un elemento estructural de elipse con tamaño de 3 pixeles de radio como se muestra en la Figura 22 para obtener la imagen I_{DIL} .



0	1	0
1	1	1
0	1	0

Figura 22. Elemento estructural en forma de elipse/círculo

5. Relleno de áreas cerradas (*Floodfill*). La imagen I_{DIL} se expande un pixel en cada sentido para poder realizar la operación de relleno, que identifica las áreas delimitadas con los contornos resultantes para llevar a cabo la función *floodfill* de OpenCV [44]. Al final se realiza una resta de las áreas rellenas y se elimina el pixel extra adherido previamente en cada sentido para obtener la imagen I_{FLOOD} .

6. Erosión. Se realiza el proceso de erosión a la imagen I_{FLOOD} utilizando el mismo elemento estructural tipo elipse, pero con un tamaño de 4 pixeles para obtener la imagen I_{ERO} .

7. Detección del contorno principal. Se utiliza la función *findContours* de *OpenCV* [45] con la imagen I_{ERO} para detectar un contorno a la vez y cada nuevo contorno que es identificado se compara con el contorno previamente detectado, de manera que siempre se toma el contorno con mayor área; esta operación se realiza hasta haber analizado todos los contornos, de manera que el contorno que tiene un área mayor permanece en la nueva imagen I_{CONT} .

8. Selección del área de interés. Se realiza una copia de la imagen original I_{BGR} aplicando la máscara del contorno con área mayor de la imagen I_{CONT} para obtener la imagen I_{ROI} que contiene el área de interés, es decir, la tarjeta electrónica y sus componentes.

4.6 Procedimiento de registro entre imágenes

Tomando la imagen bajo inspección se realiza el registro de ésta para alinearla con la imagen de referencia, de manera que los componentes, pistas, puntos de soldadura y elementos en general de ambas tarjetas tengan la mayor cantidad de puntos de coincidencia. El procedimiento de registro se presenta a continuación y en la Sección 5.3 se muestran las imágenes relacionadas a estos pasos.

1. Carga de imágenes. Se carga la imagen de referencia con el área de interés I_{ROI_1} , así como la imagen que se va a registrar con el área de interés I_{ROI_2} .

2. Registro entre las imágenes. Las imágenes I_{ROI_1} e I_{ROI_2} se convierten a escala de grises (I_{GRAY_1} e I_{GRAY_2}) y a partir de ellas se detectan y calculan los puntos de coincidencia (*keypoints*) y sus descriptores [46]. Se consideran 10,000 puntos de coincidencia para tener un resultado óptimo en el procedimiento. Enseguida, se aplica la operación de coincidencia *Matcher* de *OpenCV* y el descriptor de fuerza bruta *Hamming*, para ordenar los puntos de coincidencia por su

calificación (score) [46]. El 15% de los puntos con calificación más baja son eliminados y el resto es desplegado sobre las imágenes originales, trazando líneas que conectan a los respectivos puntos de cada imagen para obtener la imagen I_{MATCH} , tal como se muestra en la Figura 23.

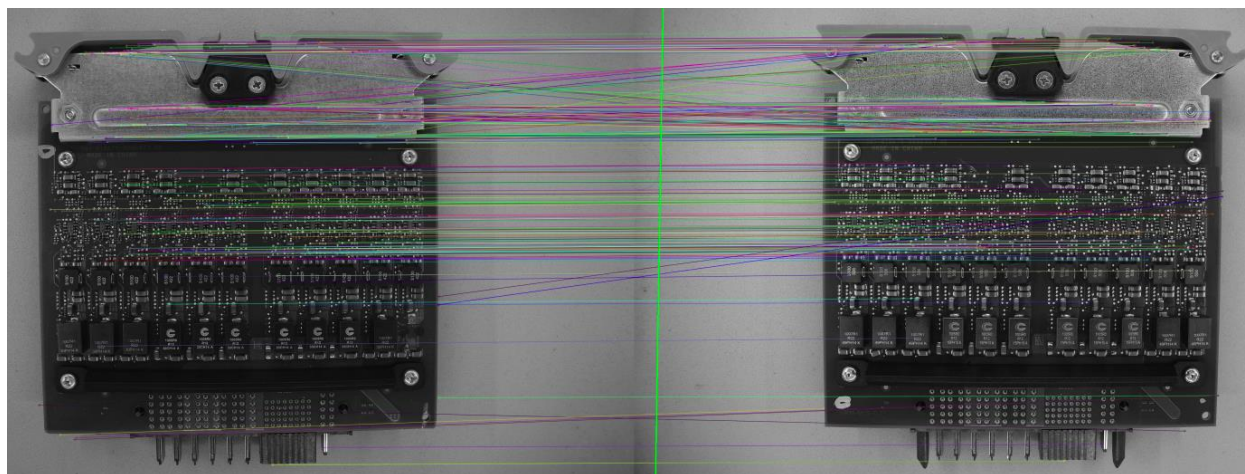


Figura 23. Puntos de coincidencia para el registro de una imagen

Los puntos de coincidencia se utilizan para generar una homografía que permite ajustar la perspectiva de la imagen a inspeccionar (o registrar) para que concuerde lo mejor posible con la imagen de referencia. Este procedimiento puede generar áreas negras en los extremos de la imagen a registrar, las cuales representan áreas que no fueron capturadas en la imagen a inspeccionar presentes en la imagen de referencia, pero que por su ubicación suelen no ser relevantes. La imagen resultante es I_{REG} que básicamente es el reemplazo de la imagen I_{ROI_2} .

3. Almacenamiento y despliegue de imágenes. La imagen de referencia I_{ROI_1} , así como la imagen registrada I_{REG} son desplegadas y almacenadas para su uso posterior. La imagen I_{MATCH} con sus trazos entre los puntos de coincidencia es almacenada y se puede desplegar de manera opcional.

4.7 Algoritmo para el análisis de colores

El algoritmo basado en el análisis de colores utiliza las imágenes I_{ROI_1} e I_{ROI_2} y ambas cumplen el requerimiento de utilizar las mismas condiciones de iluminación en el prototipo de captura. Los pasos del algoritmo se presentan a continuación y en la Sección 5.4 se muestran las imágenes relacionadas a estos pasos.

1. Carga de imágenes. Abrir la imagen de referencia I_{ROI_1} así como la imagen registrada bajo inspección I_{ROI_2} , ambas en formato RGB.
2. Conversión a espacio de color CIE $L^*a^*b^*$. Las imágenes I_{ROI_1} e I_{ROI_2} son convertidas a las imágenes I_{LAB_1} e I_{LAB_2} en el espacio de color CIE $L^*a^*b^*$ [18], por lo que éstas pasan de contener tres canales en tonos de rojo, verde y azul, a imágenes con un canal de intensidad (L^*), un canal con tonos entre verde y rojo (a^*) y un canal con tonos entre azul y amarillo (b^*). Se realizaron análisis y pruebas con otros espacios de color, pero CIE $L^*a^*b^*$ dio los mejores resultados.
3. Disminución del ruido. Se disminuye el ruido (tipo nieve) presente en las imágenes I_{LAB_1} e I_{LAB_2} mediante la aplicación de la función *medianBlur* de OpenCV utilizando un tamaño del *kernel* de 9, con lo que se obtienen las imágenes I_{BLUR_1} e I_{BLUR_2} .
4. Ajuste de intensidad usando el valor promedio global. Se lleva a cabo un ajuste global de la intensidad de la imagen I_{BLUR_2} , tomando como referencia el promedio global de la imagen de referencia I_{BLUR_1} [47], con lo que se obtiene la imagen I_{INT_2} , mientras que I_{INT_1} es una copia de I_{BLUR_1} .
5. Pixelado de las imágenes. Las imágenes I_{INT_1} e I_{INT_2} son pixeladas de manera que se consideran bloques de 3×3 píxeles donde el valor de intensidad que se

asigna a cada uno de los 9 píxeles dentro del bloque es el promedio de intensidad de dichos píxeles. El resultado son las imágenes I_{PIX_1} e I_{PIX_2} .

6. Restas del valor de intensidad. Se realiza el cálculo de la resta de intensidades entre ambas imágenes y en ambos sentidos, es decir, la imagen de referencia menos la imagen bajo inspección ($I_{INT_1} - I_{INT_2}$) para obtener la imagen I_{1-2} y la imagen bajo inspección menos la imagen de referencia ($I_{INT_2} - I_{INT_1}$) para obtener la imagen I_{2-1} ; ambas imágenes I_{1-2} e I_{2-1} resaltarán las diferencias entre los colores de ambas tarjetas. Dado que la resta de intensidades se realiza de pixel a pixel entre ambas imágenes, es importante el registro de la imagen bajo inspección para que sus componentes coincidan con los de la imagen de referencia.

7. Distancia de color. La imagen I_{DIST} se obtiene elevando al cuadrado cada uno de los valores de intensidad de la imagen I_{1-2} y luego aplicándole una raíz cuadrada [47] a cada elemento. I_{DIST} contiene la distancia de color entre cada uno de los píxeles de las imágenes I_{1-2} e I_{2-1} .

8. Separación de canales. Una de las ventajas de utilizar el espacio de color CIE $L^*a^*b^*$ es la segmentación de información en cada uno de sus tres canales; en este paso se separan los canales de la imagen I_{1-2} para generar las imágenes I_{1-2_L} , I_{1-2_A} e I_{1-2_B} para los canales 0, 1 y 2 respectivamente; siguiendo la misma secuencia se obtienen las imágenes I_{2-1_L} , I_{2-1_A} e I_{2-1_B} de la imagen I_{2-1} , así como las imágenes I_{DIST_L} , I_{DIST_A} e I_{DIST_B} de la imagen I_{DIST} .

9. Almacenamiento y despliegue de imágenes. Las imágenes obtenidas en los pasos 7 y 8 son almacenadas para su uso posterior y debido a la gran cantidad de ellas se puede seleccionar una muestra para ser desplegadas.

4.8 Algoritmo para el análisis de contornos

El algoritmo basado en el análisis de contornos también utiliza las imágenes I_{ROI_1} e I_{ROI_2} y ambas cumplen el requerimiento de utilizar las mismas condiciones de iluminación en el prototipo de captura. Los pasos del algoritmo se presentan a continuación y en la Sección 5.5 se muestran las imágenes relacionadas a estos pasos.

1. Carga de imágenes. Abrir la imagen de referencia I_{ROI_1} así como la imagen registrada bajo inspección I_{ROI_2} , ambas en formato RGB.
2. Conversión a escala de grises. Las imágenes I_{ROI_1} e I_{ROI_2} son convertidas a las imágenes I_{GRAY_1} e I_{GRAY_2} en escala de grises, por lo que éstas pasan de contener tres canales a un solo canal (de intensidad).
3. Ecualización de histogramas. Se realiza una ecualización de los histogramas de las imágenes I_{GRAY_1} e I_{GRAY_2} para obtener las imágenes I_{EQ_1} e I_{EQ_2} las cuales cuentan con un contraste de intensidad más uniforme.
4. Disminución del ruido. A las imágenes I_{EQ_1} e I_{EQ_2} se les aplica una operación de difuminado con un *kernel* de 13×13 para disminuir el ruido tipo nieve, obteniendo las imágenes I_{BLUR_1} e I_{BLUR_2} .
5. Detección de contornos. A las imágenes I_{BLUR_1} e I_{BLUR_2} se les aplica el algoritmo Canny para detectar los contornos en las imágenes, utilizando un valor de umbral (*threshold*) de 64 con una apertura de 3 para el operador Sobel. Los resultados se guardan en las imágenes I_{CAN_1} e I_{CAN_2} .
6. Dilatación de las imágenes. Se realiza una dilatación de los contornos detectados en las imágenes I_{CAN_1} e I_{CAN_2} utilizando un elemento estructural en forma de cruz con tamaño de 3 píxeles por lado, como se muestra en la Figura 24. Esto permite obtener las imágenes I_{DIL_1} e I_{DIL_2} [48]. La dilatación puede

permitir que algunos de los contornos que no fueron conectados durante la detección del paso previo se conecten.

1	0	1
0	1	0
1	0	1

Figura 24. Elemento estructural en forma de cruz

7. Erosión de las imágenes. Se realiza el proceso de erosión a las imágenes I_{DIL_1} e I_{DIL_2} utilizando el mismo elemento estructural en tipo de cruz, con el mismo tamaño de 3 pixeles, para obtener las imágenes I_{ERO_1} e I_{ERO_2} [48]. La erosión realiza una limpieza del paso previo con la posibilidad de mantener los nuevos contornos conectados intactos.

8. Distinción de contornos. A las imágenes I_{ERO_1} e I_{ERO_2} se les aplica la operación *findContours* de *OpenCV* para identificar los contornos de los objetos. Para el primer caso se obtiene la imagen I_{CONT_1} con los contornos resaltados en color amarillo; para el segundo caso se obtiene la imagen I_{CONT_2} con los contornos resaltados en color rojo.

9. Mezcla de contornos. Las imágenes I_{CONT_1} (contornos amarillos) e I_{CONT_2} (contornos rojos) son mezcladas en una sola imagen I_{MIX} mediante la operación *addWeighted* de *OpenCV*, de manera que cada una proporciona un 50% de intensidad.

10. Identificación de traslapes entre contornos. Un efecto resultante en la imagen I_{MIX} generada en el paso anterior es que el traslape de los contornos amarillos y

rojos se identifica con la suma de ambos colores, el cual es reemplazado con el color verde para indicar la correspondencia de contornos en ambas tarjetas.

11. Eliminación de traslapes. La imagen I_{XOR} es una copia de I_{MIX} de la cual se eliminan los contornos que se traslapan (en color verde), lo que deja solo los segmentos de contornos amarillos (de la tarjeta de referencia) y los segmentos de contornos rojos (de la tarjeta bajo inspección) que no coinciden en ambas tarjetas.

A los contornos traslapados se les puede aplicar una operación de dilatación previa a su eliminación, lo cual reduce la cantidad de información por analizar de forma considerable.

12. Almacenamiento y despliegue de imágenes. Las imágenes I_{MIX} e I_{XOR} son desplegadas y almacenadas para su uso posterior.

4.9 Algoritmo para el análisis de sombras

El algoritmo propuesto para el análisis de sombras utiliza las imágenes I_{ROI_1} e I_{ROI_2} (que ya ha sido registrada con la imagen I_{ROI_1}) que cumplen con el siguiente requerimiento: utilizar las mismas condiciones de iluminación en el prototipo de captura, de manera que se utiliza una sola fuente de iluminación lateral que genera una proyección de sombras similar entre los componentes de ambas tarjetas electrónicas. Los pasos del algoritmo se presentan a continuación y en la Sección 5.6 se muestran las imágenes relacionadas a estos pasos.

1. Carga de imágenes. Abrir la imagen de referencia I_{ROI_1} así como la imagen registrada bajo inspección I_{ROI_2} , ambas en formato RGB.

2. Conversión a escala de grises. Las imágenes I_{ROI_1} e I_{ROI_2} son convertidas a las imágenes I_{GRAY_1} e I_{GRAY_2} en escala de grises, por lo que éstas pasan de contener tres canales a un solo canal (de intensidad).

3. Ecualización de histogramas. Se realiza una ecualización de los histogramas de las imágenes I_{GRAY_1} e I_{GRAY_2} para obtener las imágenes I_{EQ_1} e I_{EQ_2} las cuales cuentan con un contraste de intensidad más uniforme.

4. Restas del valor de intensidad. Se realiza el cálculo de la resta de intensidades entre ambas imágenes y en ambos sentidos, es decir, la imagen de referencia menos la imagen bajo inspección ($I_{EQ_1} - I_{EQ_2}$) para obtener la imagen I_{1-2} y la imagen bajo inspección menos la imagen de referencia ($I_{EQ_2} - I_{EQ_1}$) para obtener la imagen I_{2-1} ; ambas imágenes I_{1-2} e I_{2-1} resaltarán las diferencias entre las sombras de ambas tarjetas. Es de notar que la resta de intensidades se realiza de pixel a pixel entre ambas imágenes, de ahí la importancia del registro de la imagen bajo inspección para que sus componentes coincidan con los de la imagen de referencia.

Cuando los valores de intensidad de los píxeles respectivos de ambas tarjetas son similares, el resultado de la resta (ya sea en I_{1-2} o en I_{2-1}) será un valor cercano a cero, lo cual se traduce a un pixel oscuro en la imagen resultante; por el contrario, cuando la intensidad de los píxeles respectivos no concuerda debido a un componente faltante, dañado, o fuera de su lugar, la resta tenderá a dar un resultado mayor en la escala de 0 a 255, que se traduce en un pixel más claro en la imagen resultante; un operador del sistema podrá identificar las zonas más claras en las imágenes resultantes de las restas, como áreas donde posiblemente se presente un problema en una de las tarjetas, principalmente en la tarjeta bajo inspección.

5. Almacenamiento y despliegue de imágenes. Las imágenes I_{1-2} e I_{2-1} son desplegadas y almacenadas para su uso posterior.

Con el algoritmo basado en el análisis de sombras se pueden identificar diferencias que pueden significar anomalías en la tarjeta, tales como un componente faltante, un componente deformado (como los ejemplos de la Figura 18 al inicio del Capítulo 4), o un cambio de versión en la tarjeta que requiere una nueva captura de patrones de referencia. Las diferencias también pueden consistir en un ligero cambio de posición de uno o varios componentes, los cuales pueden ser permisibles según el diseño y especificaciones de la tarjeta. Todos estos casos se presentan al operador del sistema para que tome la decisión apropiada en la disposición de la tarjeta bajo inspección, lo cual representa una gran ayuda para su proceso.

4.10 Muestra de resultados

Las diferencias más relevantes entre la tarjeta de referencia y la tarjeta bajo inspección es la principal información que se puede proporcionar al operador del sistema para llevar a cabo la toma de decisiones sobre la calidad del producto. Cada uno de los algoritmos presentados despliega en su última etapa las imágenes más relevantes para la identificación de fallas o defectos, donde el operador los toma como referencia para observar con mayor detenimiento esas zonas específicas en la tarjeta bajo inspección.

En la Sección 5.8.2 se presenta la interfaz de usuario propuesta para presentar los resultados de los diversos algoritmos al operador del sistema y se describe cada uno de los paneles con que cuenta.

4.11 Algoritmo para identificar zonas de interés

Las zonas de interés que se visualizan mediante este algoritmo sirven como un indicador adicional para que el operador del sistema analice dichas zonas, ya que éstas presentan un cambio considerable del valor de intensidad entre las tarjetas.

Tomando como base las imágenes I_{1-2} e I_{2-1} obtenidas con el algoritmo para el análisis de sombras, los pasos del algoritmo son los siguientes y en la Sección 5.7 se muestran las imágenes relacionadas a estos pasos:

1. Lectura del número de filas y columnas. La información del número de filas (I_{rows}) y número de columnas (I_{cols}) es utilizada para calcular la cantidad de bloques a procesar para cada imagen.
2. Cálculo del número de bloques a procesar. El tamaño del bloque a procesar está predeterminado de 80×80 píxeles y es el resultado de realizar varias pruebas con distintos tamaños. Conociendo las cantidades I_{rows} e I_{cols} se calculan cuántas filas de bloques I_{row_blocks} y columnas de bloques I_{col_blocks} se deben procesar. Pueden existir bloques de menor tamaño en la última fila y/o columna de cada imagen. Los bloques por procesar para las imágenes I_{1-2} e I_{2-1} se denominan I_{1-2_block} e I_{2-1_block} , respectivamente.
3. Cálculo de la diferencia de intensidades promedio para cada bloque. Para cada bloque I_{1-2_block} e I_{2-1_block} de cada imagen se calcula la resta del promedio entre los valores de intensidad de sus píxeles, $I_{1-2_diff} = I_{1-2_block_avg} - I_{2-1_block_avg}$, donde $I_{1-2_block_avg}$ e $I_{2-1_block_avg}$ se obtienen aplicando la función `mean()` a I_{1-2_block} e I_{2-1_block} , respectivamente.
4. Cálculo de espesor y color del contorno de los bloques. Se realiza una copia de la imagen bajo inspección I_{ROI_2} a I_{BLOCKS} en la cual se desplegarán todos los

contornos de los bloques de la imagen, utilizando el valor I_{1-2_diff} para cada bloque. El valor I_{1-2_diff} afecta el espesor y color de cada contorno de bloque, de manera que un valor cercano a cero despliega el contorno con un pixel de espesor y una intensidad nula (negro), mientras que el valor más alto para I_{1-2_diff} despliega un contorno con diez pixeles de espesor y la máxima intensidad de color; los valores intermedios de I_{1-2_diff} desplegarán contornos con espesor e intensidad dentro del rango. El espesor e intensidad del contorno es directamente proporcional con la relevancia del bloque, debido a la diferencia de intensidades (por las sombras y zonas iluminadas) entre los bloques de las imágenes que son comparadas, llamando la atención del operador hacia dichos bloques o zonas.

5. Almacenamiento y despliegue de la imagen. La imagen I_{BLOCKS} con los contornos de los bloques es desplegada y almacenada para su uso posterior. En la Sección 5.7 se muestran las imágenes relacionadas a estos pasos.

El algoritmo para la identificación de las zonas de interés aplicado al análisis de sombras aquí descrito se puede tomar como base para desarrollos futuros y adaptarse tanto para los algoritmos de análisis de colores, así como para el análisis de contornos, utilizando el concepto de bloques de forma similar.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

En este capítulo se presentan los detalles del análisis experimental realizado con el método propuesto, así como las variaciones y ajustes hechos para lograr obtener mejores resultados en la práctica.

5.1 Captura de imágenes

En la Figura 25 se muestran algunos ejemplos de las imágenes capturadas para una tarjeta en particular. La captura de imágenes para las tarjetas bajo inspección se realiza bajo las mismas condiciones de posicionamiento e iluminación especificadas para la tarjeta de referencia.

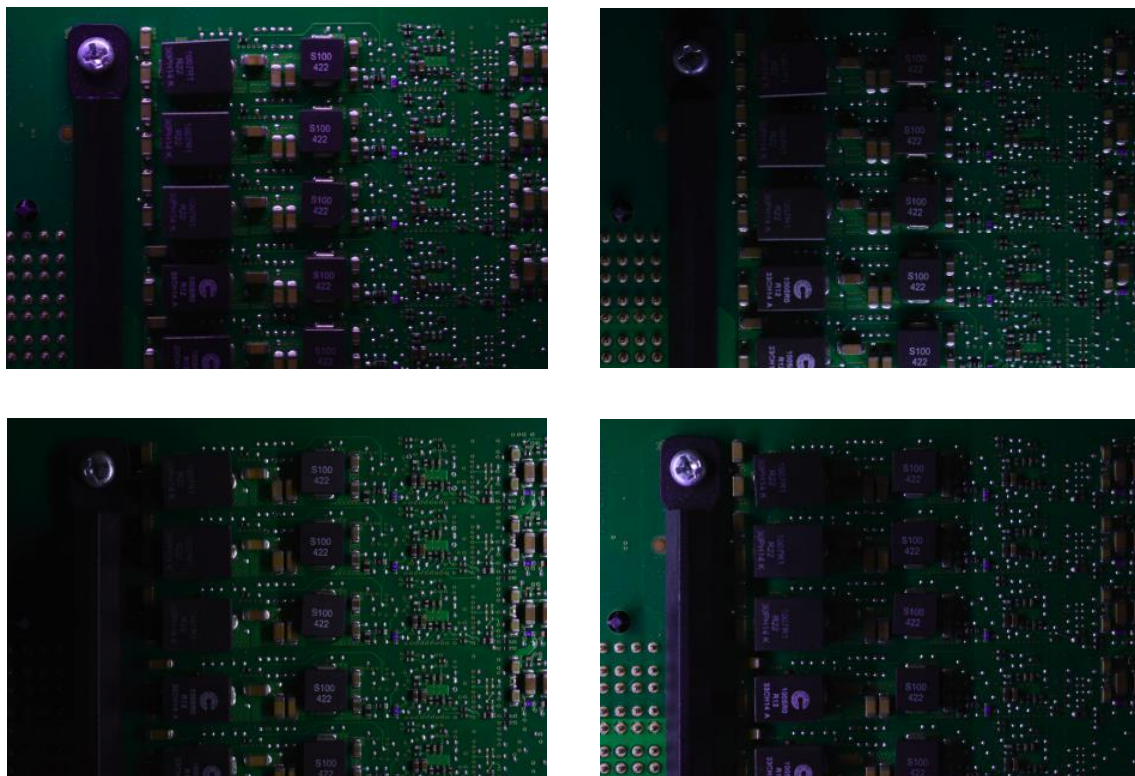
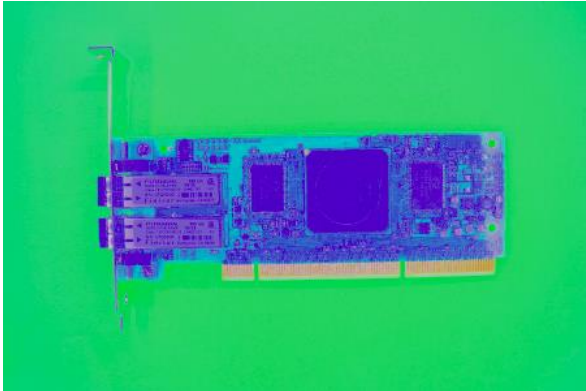


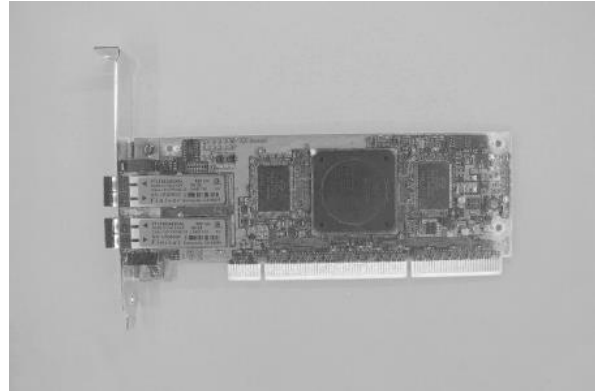
Figura 25. Captura de imágenes para una sección de la tarjeta electrónica

5.2 Eliminación del fondo de la imagen

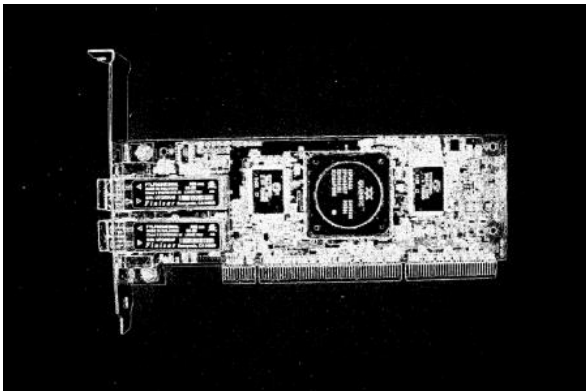
En la Figura 26 se muestran los resultados de la secuencia de pasos descrita en la Sección 4.5 para la eliminación de las áreas del fondo de la imagen. El área debajo de la tarjeta al ser de color verde, uniforme y sin brillos, facilita el proceso de eliminación.



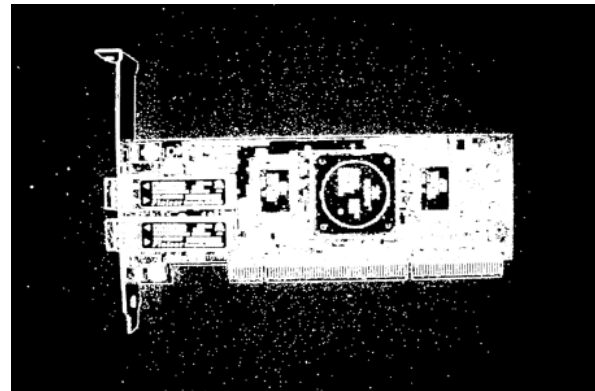
(a)



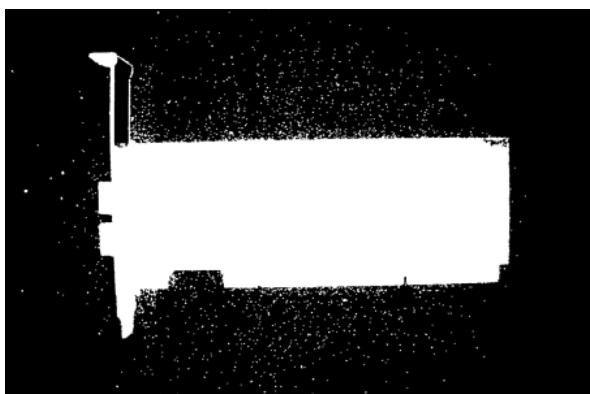
(b)



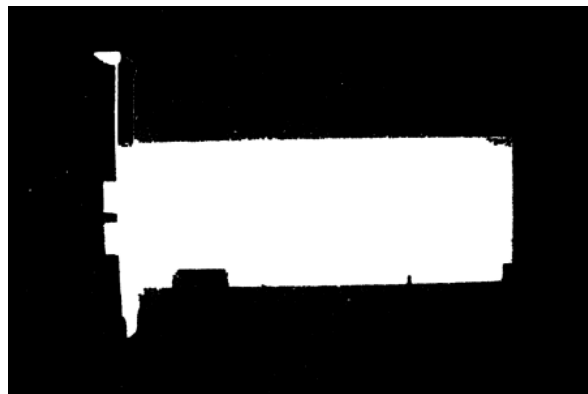
(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 26. Secuencia de pasos para eliminar el fondo de la imagen: (a) disminución de la intensidad de las sombras, (b) conversión a escala de grises y normalización, (c) detección de contornos, (d) dilatación, (e) relleno de áreas cerradas, (f) erosión, (g) detección del contorno principal, (h) selección del área de interés

No es necesario realizar el procedimiento de eliminación del fondo cuando la captura de imágenes se realiza para una sección de la tarjeta electrónica en donde no queda ninguna área del fondo visible.

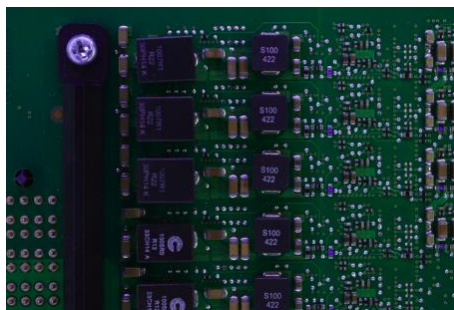
5.3 Registro entre imágenes

El proceso de registro de imágenes descrito en la Sección 4.6 se implementó utilizando 1,500 puntos de coincidencia entre las imágenes [46]. Sin embargo, al empalmar las imágenes resultantes, se podía apreciar un ligero desfase entre ambas. Se incrementaron los puntos de coincidencia gradualmente hasta llegar a los 10,000 puntos, con lo cual se logró un resultado bastante aceptable, ya que no se aprecia desfase entre los componentes de las imágenes, con un incremento imperceptible en el tiempo de procesamiento.

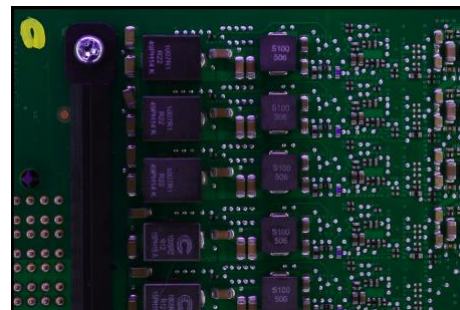
En la Figura 27 se muestra el proceso de registro, con (a) las líneas trazadas de los puntos de coincidencia, (b) la imagen de referencia y (c) la imagen registrada (bajo inspección).



(a)



(b)



(c)

Figura 27. Secuencia del proceso de registro entre imágenes: (a) puntos de coincidencia, (b) imagen de referencia, (c) imagen registrada

En la Figura 23 de la Sección 4.6 se pudo apreciar que las líneas trazadas entre las dos imágenes son principalmente horizontales y éstas concuerdan en su mayoría con el mismo punto en ambas tarjetas. En cambio, en la imagen (a) de la Figura 27 se puede apreciar que hay muchas líneas no horizontales, las cuales no concuerdan con los puntos respectivos de ambas tarjetas, de ahí la necesidad de incrementar el parámetro de la cantidad de puntos de coincidencia del algoritmo de búsqueda.

Es de notarse que durante el proceso de registro de la imagen bajo inspección se pueden generar algunas áreas con fondo negro en uno o dos extremos de la imagen, debido a su desfase para coincidir con la imagen de referencia, tal como se puede apreciar en los extremos superior e izquierdo de la imagen registrada (c) de la Figura 27.

5.4 Resultados del algoritmo para el análisis de colores

A continuación, se presentan imágenes generadas por el algoritmo propuesto en la Sección 4.7 para el análisis de colores, el cual busca identificar las diferencias en apariencia y ubicación de los componentes entre la tarjeta de referencia y la tarjeta bajo inspección, así como cualquier patrón que pueda indicar una discrepancia o un caso para ser revisado con mayor detalle durante la inspección visual de calidad del producto.

1. Carga de imágenes. En la Figura 28 se muestran las imágenes de referencia (a) I_{ROI_1} así como la imagen registrada bajo inspección (b) I_{ROI_2} , ambas en formato RGB.

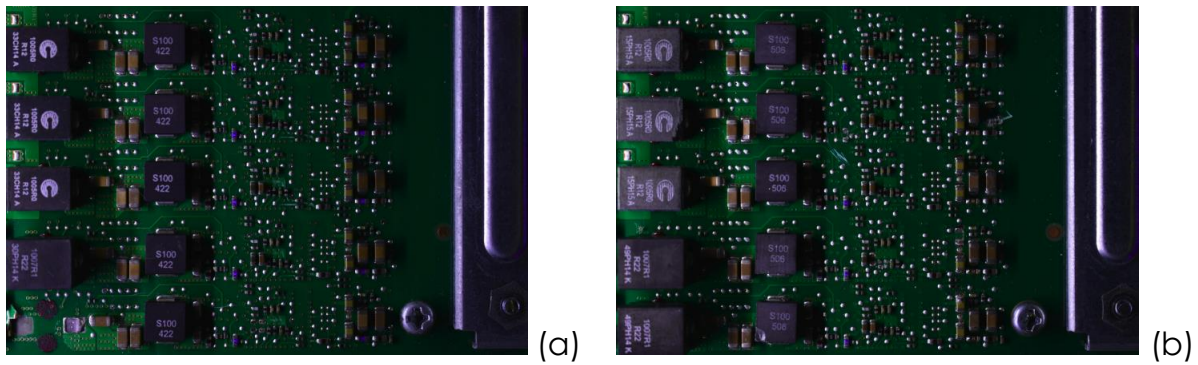


Figura 28. Imágenes de (a) referencia y (b) bajo inspección, en formato RGB

2. Conversión a espacio de color CIE $L^*a^*b^*$. Como ejemplo, en la Figura 29 se muestran (a) la imagen I_{LAB_1} en el espacio de color CIE $L^*a^*b^*$, así como (b-d) sus canales L^* , a^* y b^* . La imagen I_{LAB_2} sigue un orden similar a I_{LAB_1} .

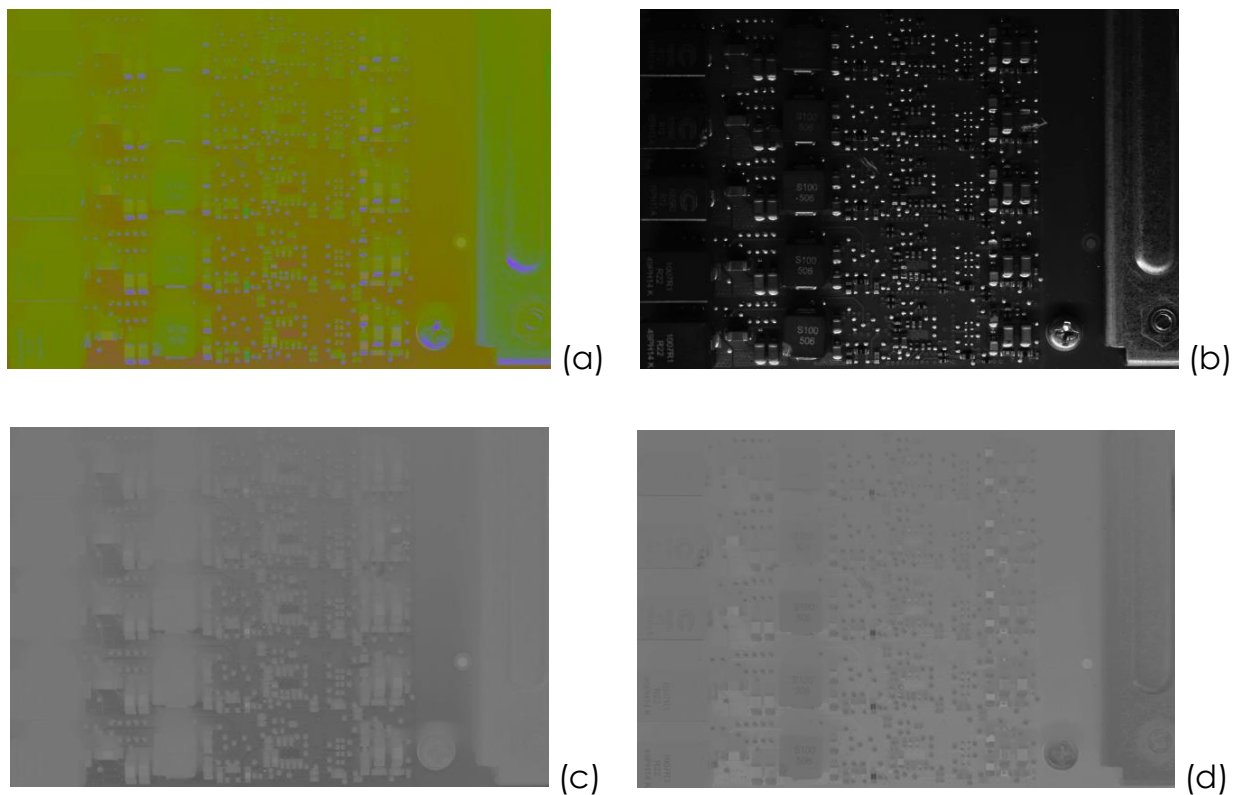


Figura 29. Imágenes en (a) espacio de color CIE $L^*a^*b^*$, (b) canal L^* , (c) canal a^* y (d) canal b^*

3. Disminución del ruido. En la Figura 30 se muestra (a) una sección de la imagen I_{LAB_1} mientras que en (b) aparece la misma sección de la imagen I_{BLUR_1} con el efecto de disminución de ruido debido al suavizado en la imagen.

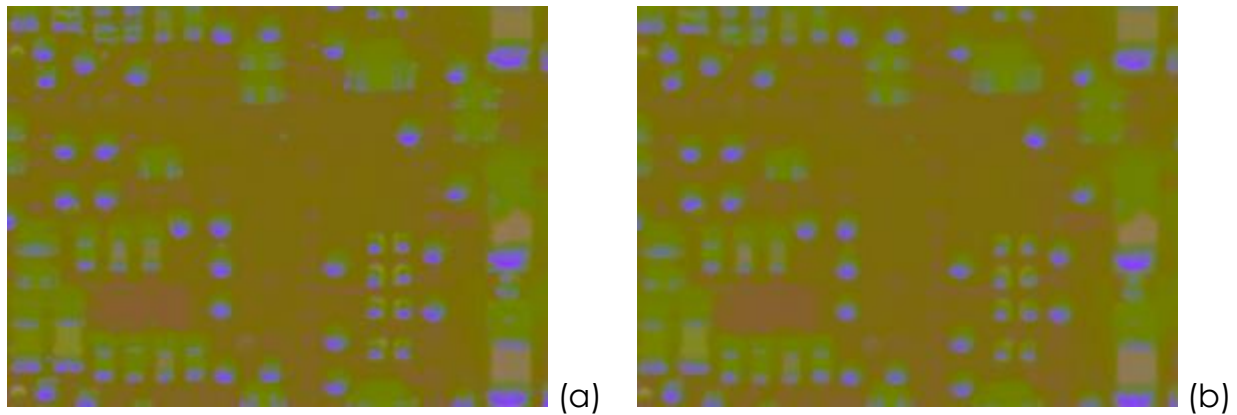


Figura 30. Sección de imagen en espacio de color CIE $L^*a^*b^*$ (a) previo al efecto de *blur* y (b) posterior al mismo

4. Ajuste de intensidad usando el valor promedio global. En la Figura 31 se pueden apreciar (a) la imagen I_{BLUR_2} (tarjeta bajo inspección) previo a su ajuste de intensidad y (b) la imagen I_{INT_2} que tiene su intensidad modificada de acuerdo con la intensidad de la imagen I_{INT_1} .

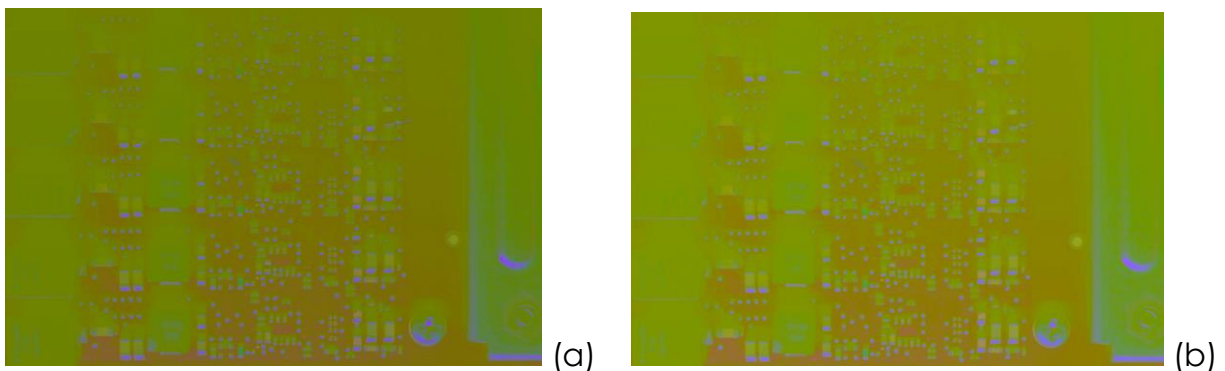


Figura 31. Imagen bajo inspección (a) previo al ajuste de intensidad y (b) posterior al mismo

5. Pixelado de las imágenes. En la Figura 32 se muestran (a) la amplificación (800%) de una sección de la imagen I_{INT_2} previo al efecto de pixelado y (b) la misma sección de la imagen I_{PIX_2} que muestra el efecto de los bloques de 3×3 pixeles.

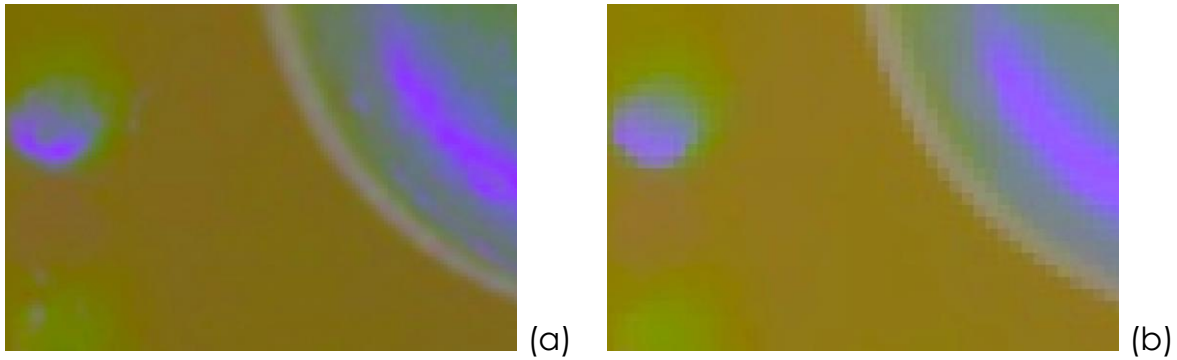


Figura 32. Imagen (a) previa al efecto de pixelado y (b) posterior al mismo

6. Restas de valores de intensidad. En la Figura 33 se muestran los resultados de las restas de los valores de intensidad (a) I_{1-2} y (b) I_{2-1} .

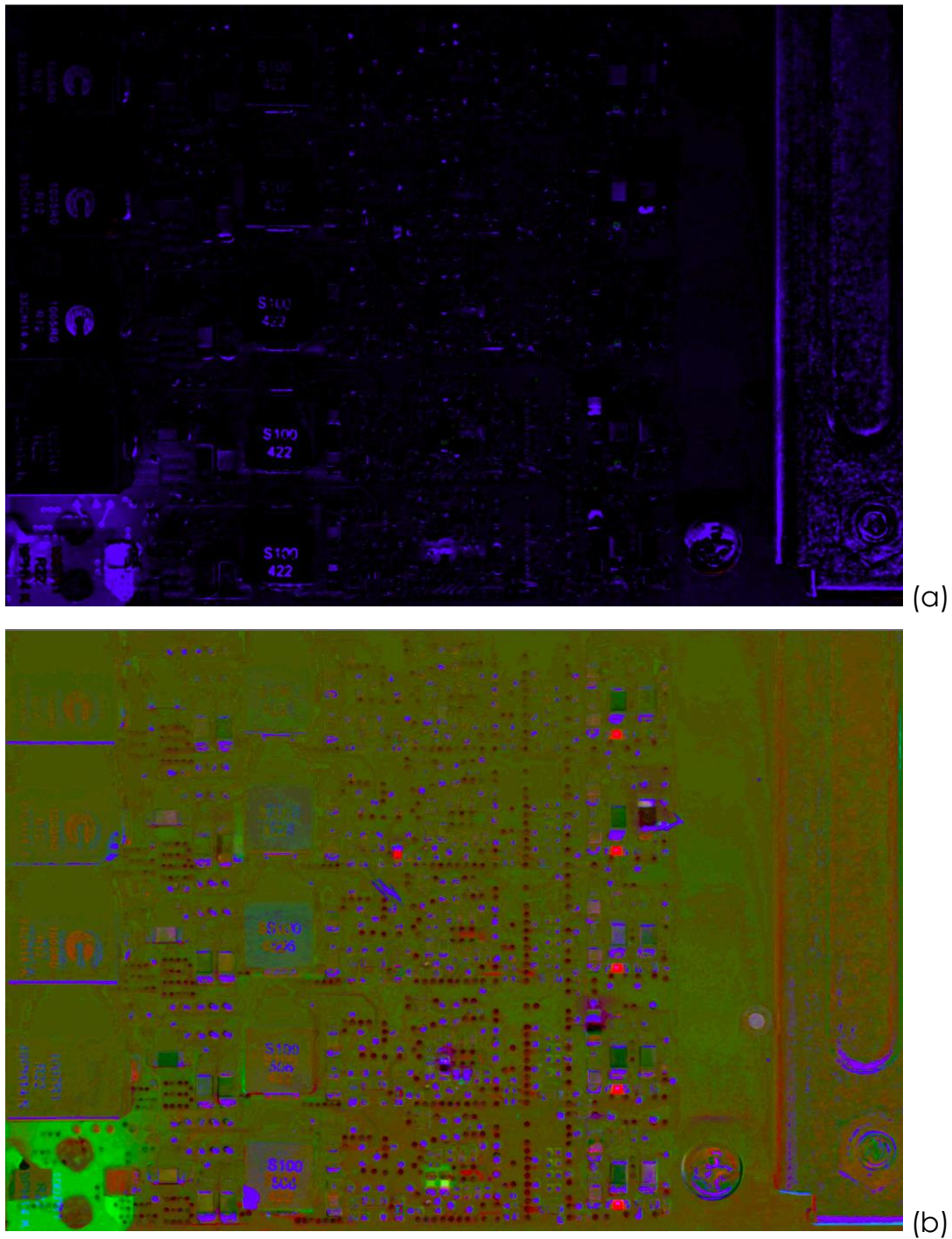


Figura 33. Imágenes de las restas de valores de intensidad de (a) tarjeta de referencia menos tarjeta bajo inspección y (b) tarjeta bajo inspección menos tarjeta de referencia

En la Figura 33 (b) es muy evidente la zona verde en la esquina inferior izquierda, producto de la falta de un componente, así como una columna con cinco componentes en color rojo en la mitad derecha de la imagen, que corresponde a componentes que tienen distinto color en ambas tarjetas, entre otros detalles.

7. Distancia de color. La Figura 34 muestra la imagen I_{DIST} con la distancia de color entre cada uno de los píxeles de las imágenes I_{1-2} e I_{2-1} .

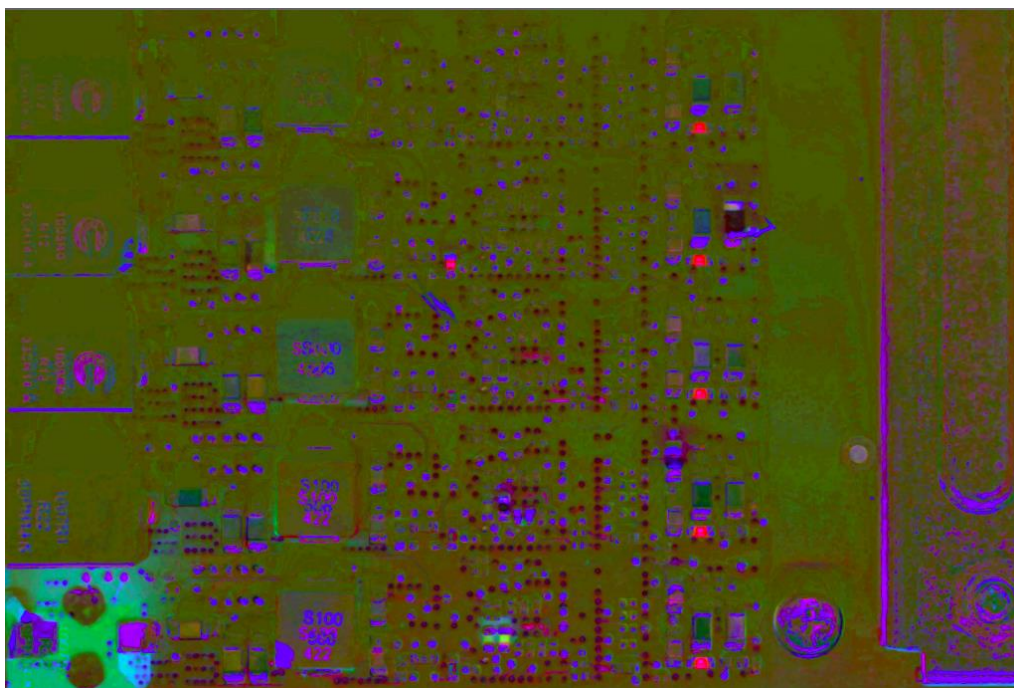


Figura 34. Imagen con la distancia de color entre los píxeles de cada imagen

8. Separación de canales. En la Figura 35 se muestran los canales separados de las imágenes en espacio de color CIE $L^*a^*b^*$: (a) canal 0 de I_{1-2_L} , (b) canal 0 de I_{2-1_L} , (c) canal 1 de I_{1-2_A} , (d) canal 1 de I_{2-1_A} , (e) canal 2 de I_{1-2_B} , (f) canal 2 de I_{2-1_B} .

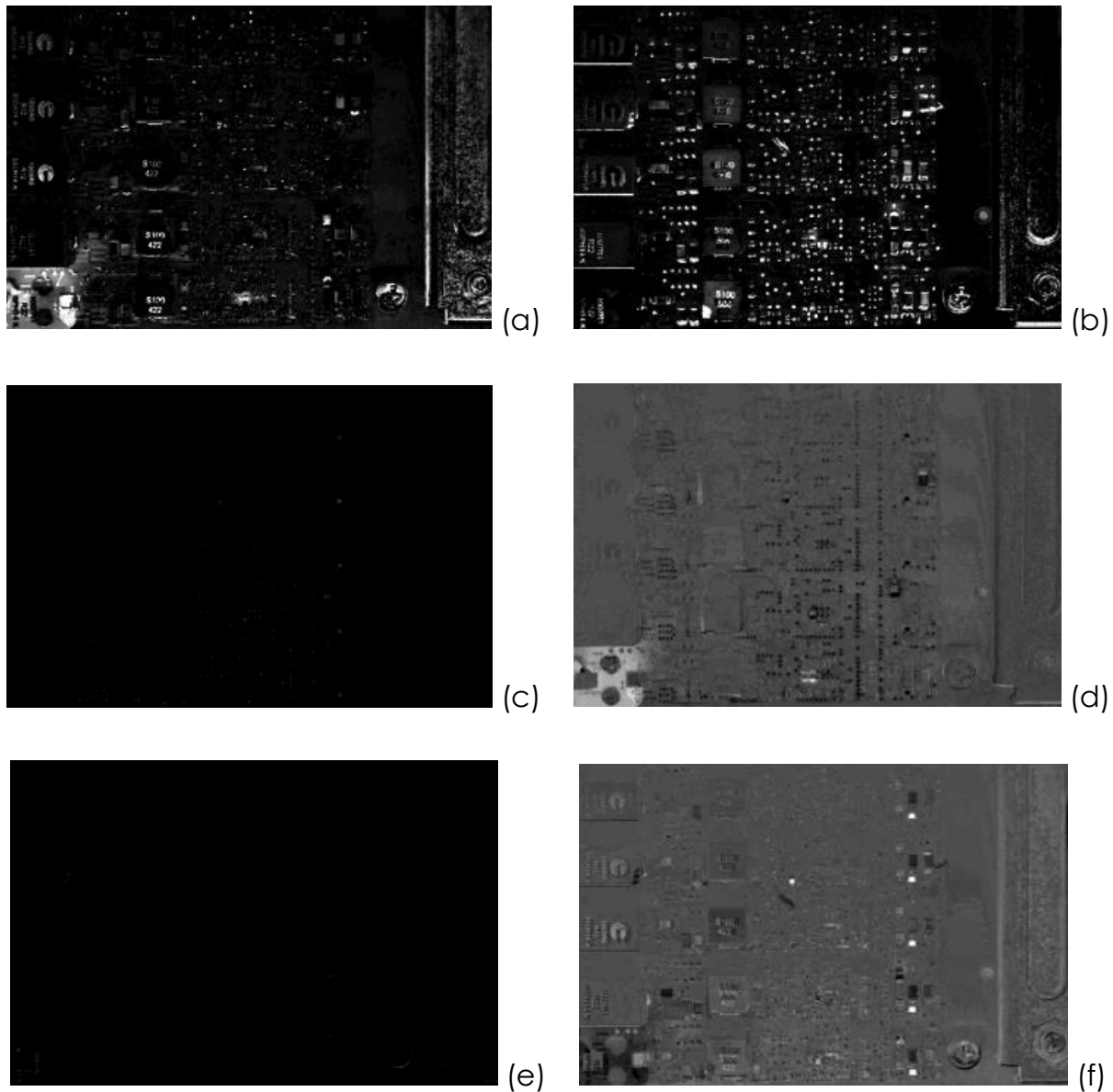


Figura 35. Imágenes de los canales separados: (a) I_{1-2_L} , (b) I_{2-1_L} , (c) I_{1-2_A} , (d) I_{2-1_A} , (e) I_{1-2_B} , (f) I_{2-1_B}

9. Almacenamiento y despliegue de imágenes. Las imágenes obtenidas en las restas de valores de intensidad (I_{1-2} e I_{2-1}), la imagen de la distancia de color I_{DIST} , así como sus canales individuales son almacenadas para su uso posterior.

En la práctica, la intensidad de las imágenes resultantes puede tener un valor muy bajo de manera que su visualización sea oscura debido a las operaciones aplicadas, por lo que se utiliza un factor multiplicador (por ejemplo, $\times 4$, o $\times 5$) para incrementar su intensidad y mejorar la visibilidad para el operador.

5.5 Resultados del algoritmo para el análisis de contornos

A continuación, se presentan imágenes generadas por el algoritmo propuesto en la Sección 4.8 para el análisis de contornos, el cual busca identificar las diferencias entre los contornos resaltados de los componentes de la tarjeta de referencia y la tarjeta bajo inspección, así como cualquier patrón que pueda indicar algún defecto potencial que se deba considerar durante la inspección visual de calidad del producto.

1. Carga de imágenes. El algoritmo inicia con las mismas imágenes mostradas en la Figura 28 de la Sección 5.4, es decir, la imagen de referencia (a) I_{ROI_1} y la imagen registrada bajo inspección (b) I_{ROI_2} , ambas en formato RGB.

2. Conversión a escala de grises. Las imágenes I_{ROI_1} e I_{ROI_2} convertidas a las imágenes I_{GRAY_1} e I_{GRAY_2} en escala de grises se muestran en la Figura 36 (a) y (b), respectivamente.

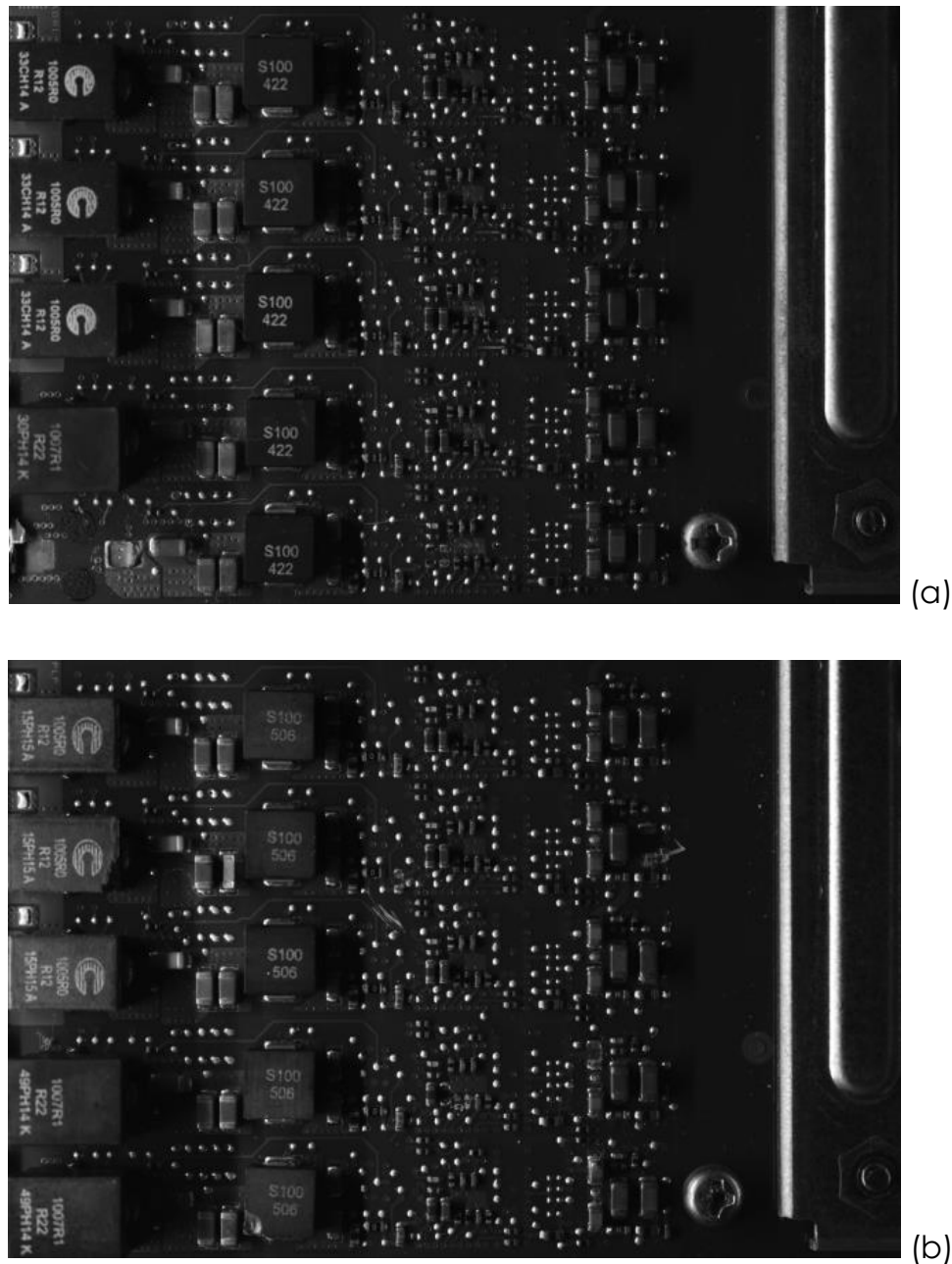


Figura 36. Imágenes de (a) referencia y (b) bajo inspección, en escala de grises

3. Ecualización de histogramas. En la Figura 37 se muestran las imágenes I_{EQ_1} e I_{EQ_2} las cuales cuentan con un contraste de intensidad más uniforme después del proceso de ecualización de sus histogramas.

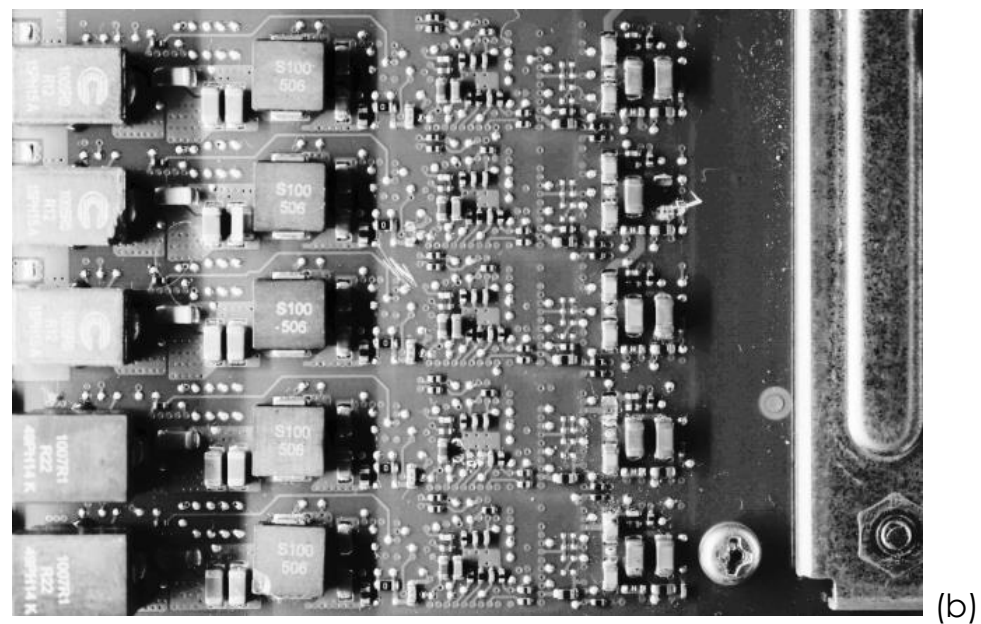
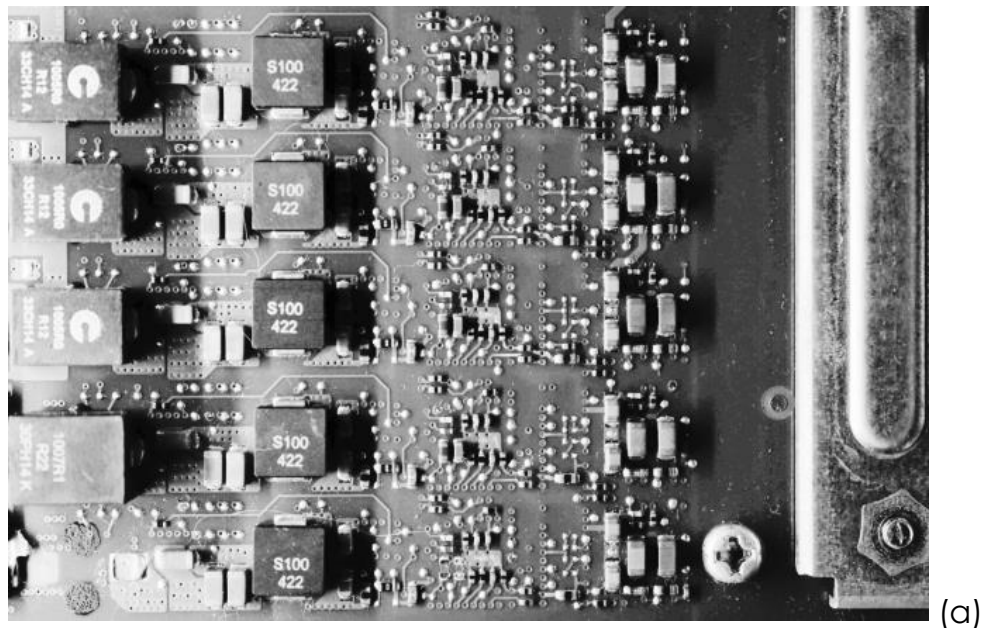
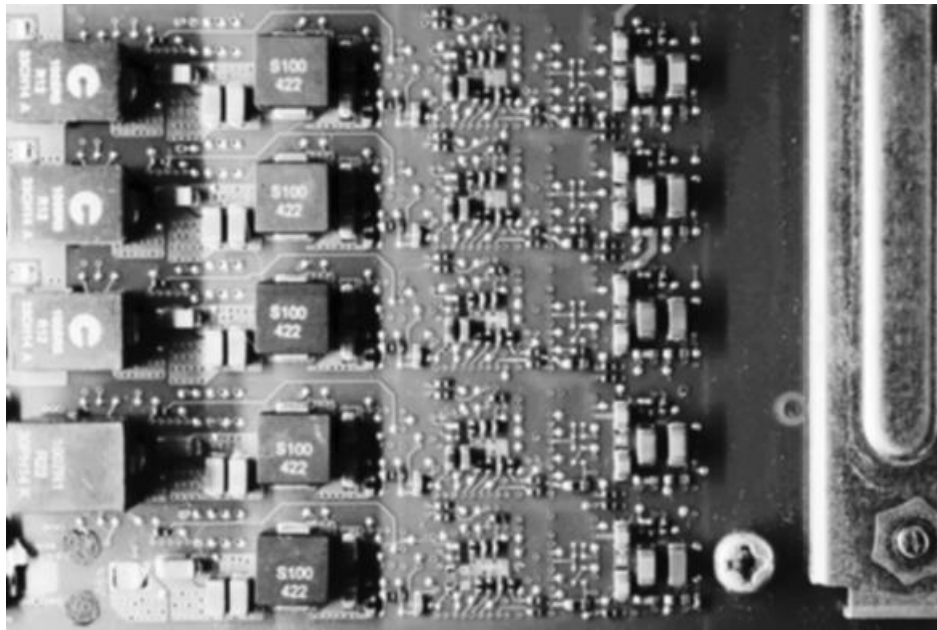
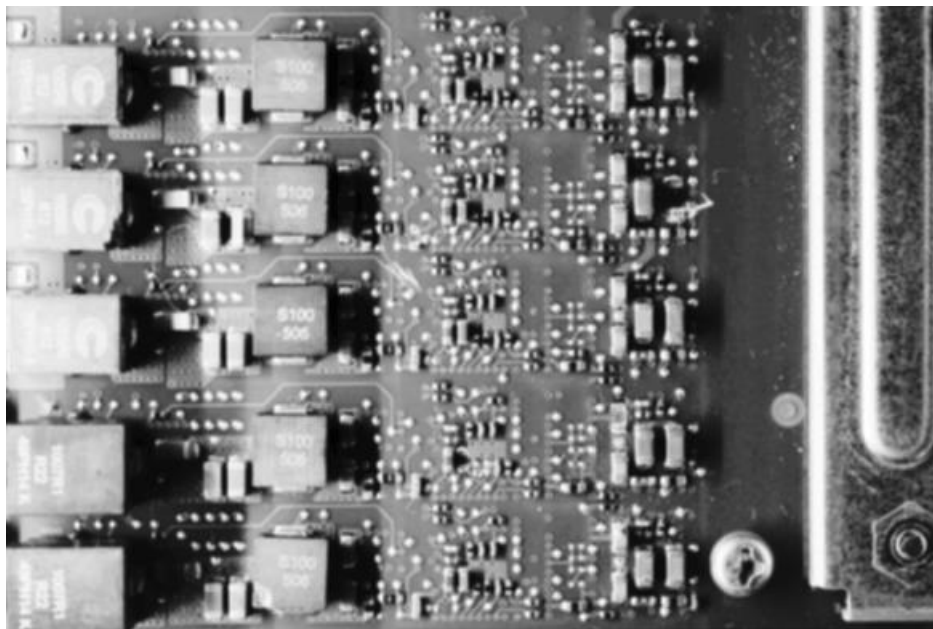


Figura 37. Imágenes de (a) referencia y (b) bajo inspección, después de la ecualización de sus histogramas

4. Disminución del ruido. En la Figura 38 se muestran las imágenes I_{BLUR_1} e I_{BLUR_2} con el efecto de difuminado aplicado, el cual ayuda a disminuir la cantidad de ruido en las imágenes.



(a)



(b)

Figura 38. Imágenes de (a) referencia y (b) bajo inspección, después del efecto de difuminado

5. Detección de contornos. En la Figura 39 se muestra un ejemplo de la imagen I_{CAN_1} con los contornos detectados de la tarjeta por el operador Canny; el resultado para la imagen I_{CAN_2} es similar.

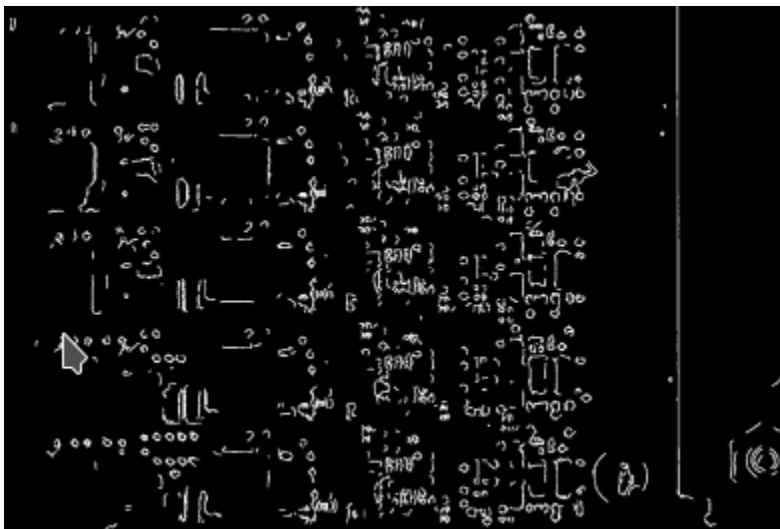


Figura 39. Imágenes con los contornos identificados por el operador Canny

6. Dilatación de las imágenes. Los contornos detectados son dilatados para generar las imágenes I_{DIL_1} e I_{DIL_2} donde se pueden conectar segmentos de contornos adicionales.

7. Erosión de las imágenes. Con el proceso de erosión se obtienen las imágenes I_{ERO_1} e I_{ERO_2} donde se recupera el espesor de los contornos con la posibilidad de contar con algunos contornos mejor conectados.

8. Distinción de contornos. Con la operación *findContours* se obtienen las imágenes de la Figura 40, donde (a) muestra I_{CONT_1} con los contornos en color amarillo para la tarjeta de referencia y en (b) I_{CONT_2} con los contornos en color rojo para la tarjeta bajo inspección.

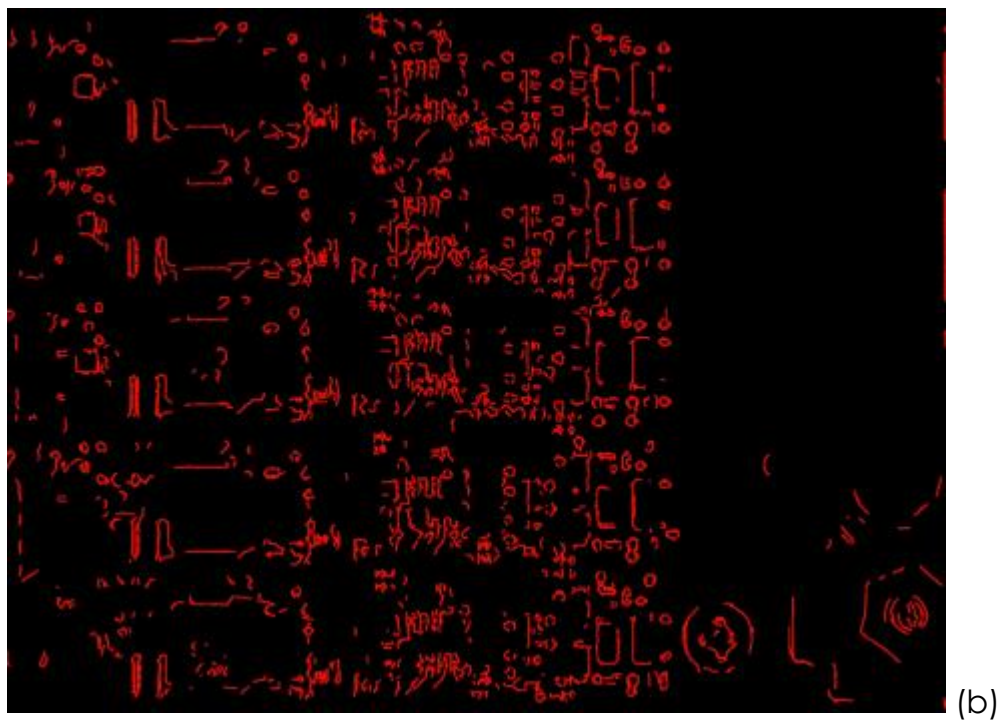
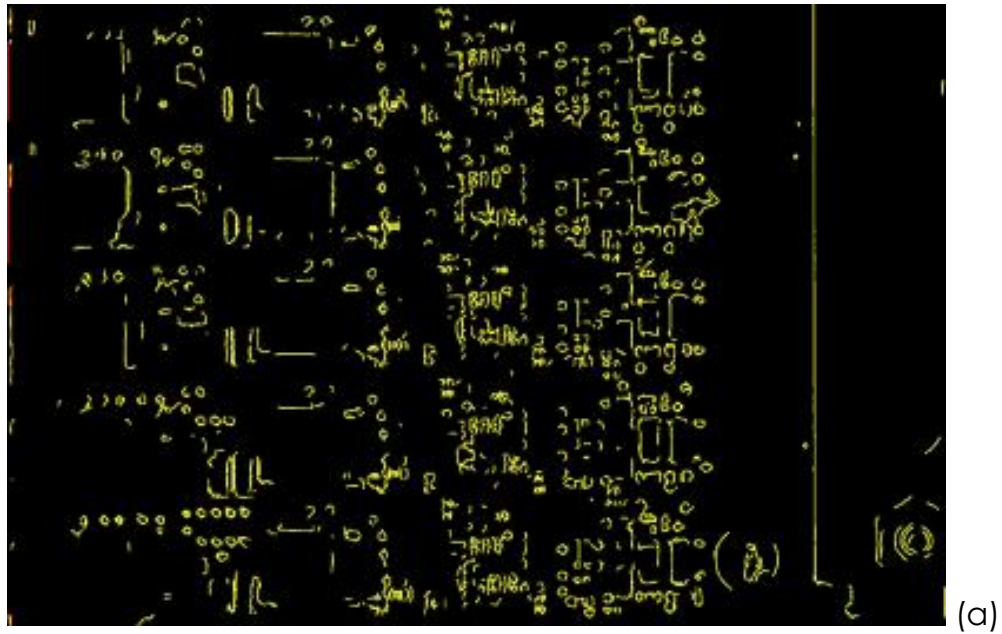


Figura 40. Imágenes con los contornos identificados para (a) la tarjeta de referencia y
(b) la tarjeta bajo inspección

9. Mezcla de contornos. En la Figura 41 se muestra la imagen I_{MIX} como resultado de la mezcla de las imágenes I_{CONT_1} e I_{CONT_2} .

10. Identificación de traslapes entre contornos. En la Figura 41 también se muestra en color verde el traslape de los contornos amarillos y rojos, el cual indica las correspondencias de contornos en ambas tarjetas.

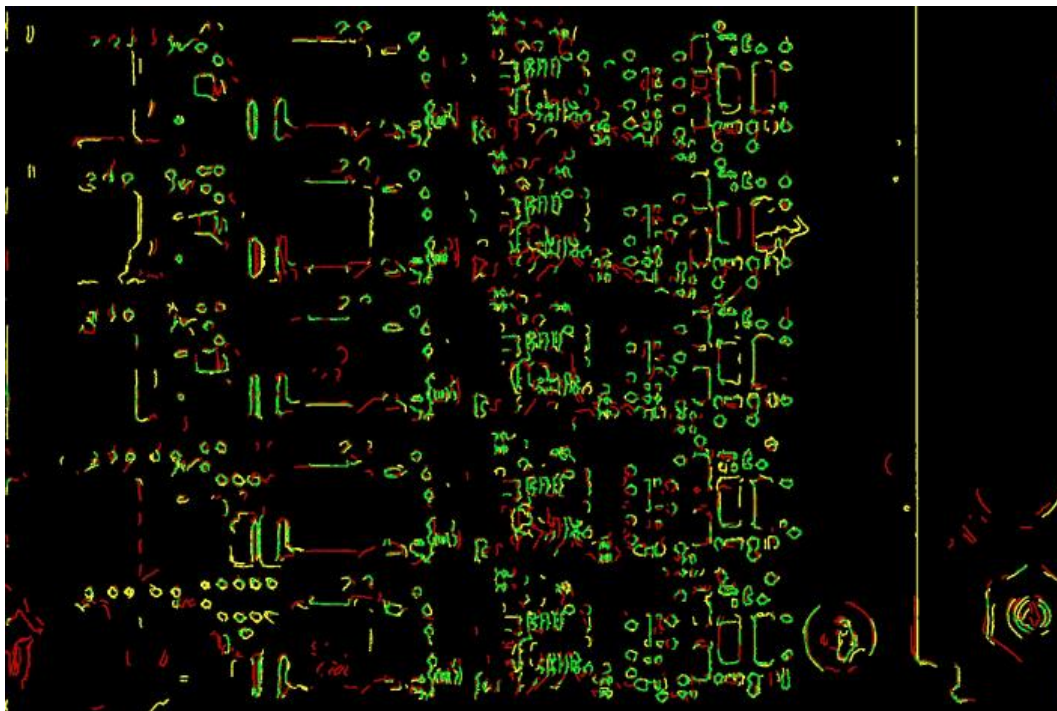


Figura 41. Imagen resultante de combinar los contornos de ambas imágenes, resaltando los traslapes con color verde

11. Eliminación de traslapes. En la Figura 42 se muestran (a) la imagen I_{XOR} con los contornos que se traslapan entre ambas tarjetas (en color verde) eliminados; y (b) la imagen I_{XOR_2} con una simplificación de contornos lograda mediante una dilatación adicional.

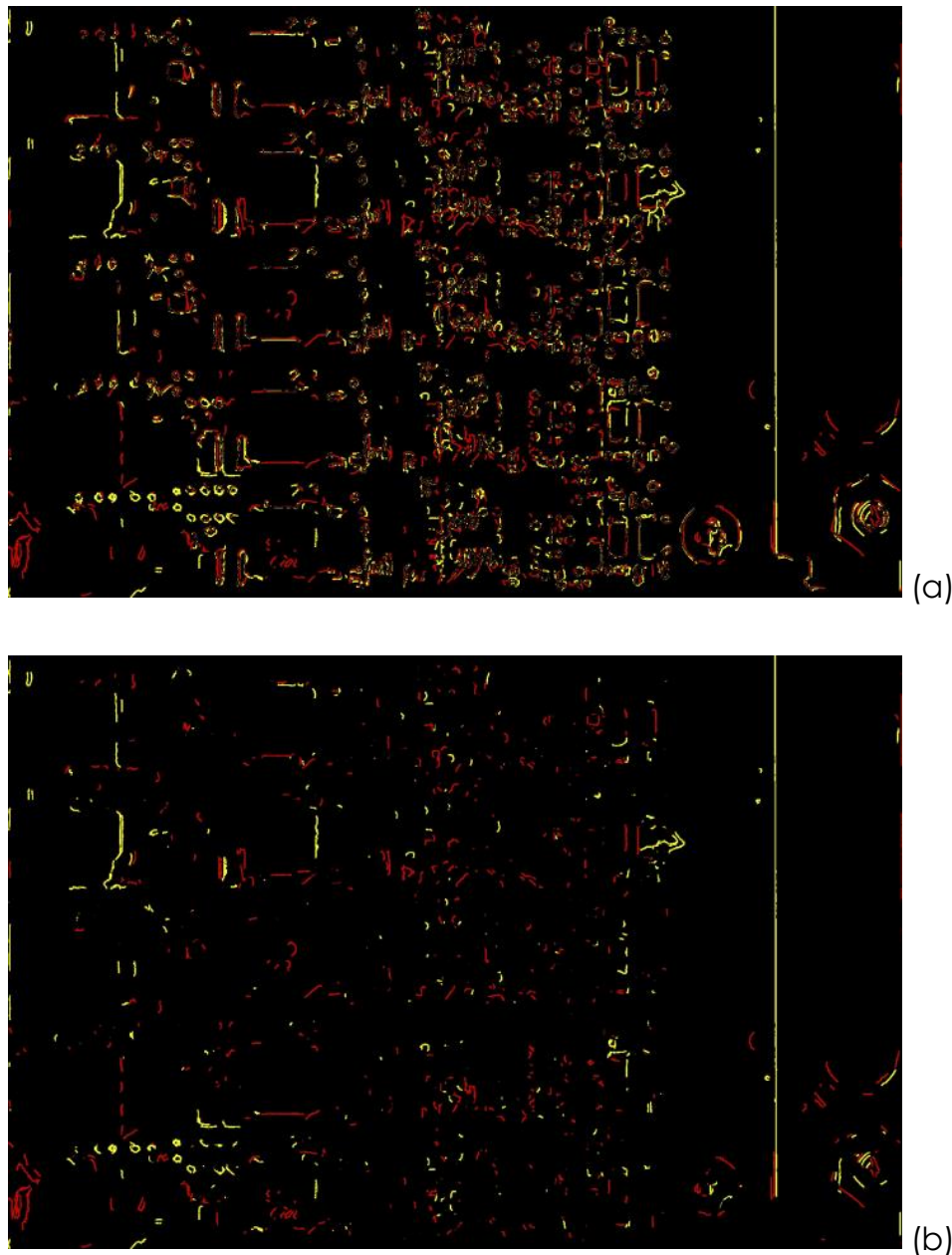


Figura 42. Imágenes con (a) los contornos traslapados eliminados y (b) simplificación de los segmentos remanentes

Los segmentos de contornos que quedan le indican al operador en qué áreas enfocar su análisis, así como el origen de la diferencia ya sea la tarjeta de referencia (amarillo) o la tarjea bajo inspección. En las áreas señaladas puede existir algún tipo de problema en la tarjeta, pero también pueden ser detalles aceptables como un componente instalado ligeramente fuera de su ubicación, pero dentro de especificación; en todos los casos el operador del sistema debe confirmar si hay un problema real o no.

12. Almacenamiento y despliegue de imágenes. Las imágenes I_{MIX} , I_{XOR} e I_{XOR_2} son desplegadas y almacenadas para su análisis y uso posterior.

5.6 Resultados del algoritmo para el análisis de sombras

A continuación, se presentan imágenes generadas por el algoritmo propuesto en la Sección 4.9 para el análisis de sombras. El algoritmo permite identificar las diferencias entre los patrones de sombras proyectadas por los componentes de la tarjeta de referencia y la tarjeta bajo inspección para indicar algún defecto potencial durante la inspección visual de calidad del producto.

1. Carga de imágenes. El algoritmo inicia con las mismas imágenes mostradas en la Figura 28 de la Sección 5.4, es decir, la imagen de referencia (a) I_{ROI_1} y la imagen registrada bajo inspección (b) I_{ROI_2} , ambas en formato RGB.

2. Conversión a escala de grises. Las imágenes convertidas a escala de grises, I_{GRAY_1} e I_{GRAY_2} , son las mismas presentadas en la Figura 36 (a) y (b) de la Sección 5.5, respectivamente.

3. Ecualización de histogramas. En la Figura 37 (a) y (b) de la Sección 5.5 se presentaron las imágenes I_{EQ_1} e I_{EQ_2} con la ecualización de sus histogramas.

4. Restas del valor de intensidad. En la Figura 43 se muestra la resta de intensidades entre la tarjeta de referencia y la tarjeta bajo inspección ($I_{1-2} = I_{EQ_1} - I_{EQ_2}$).

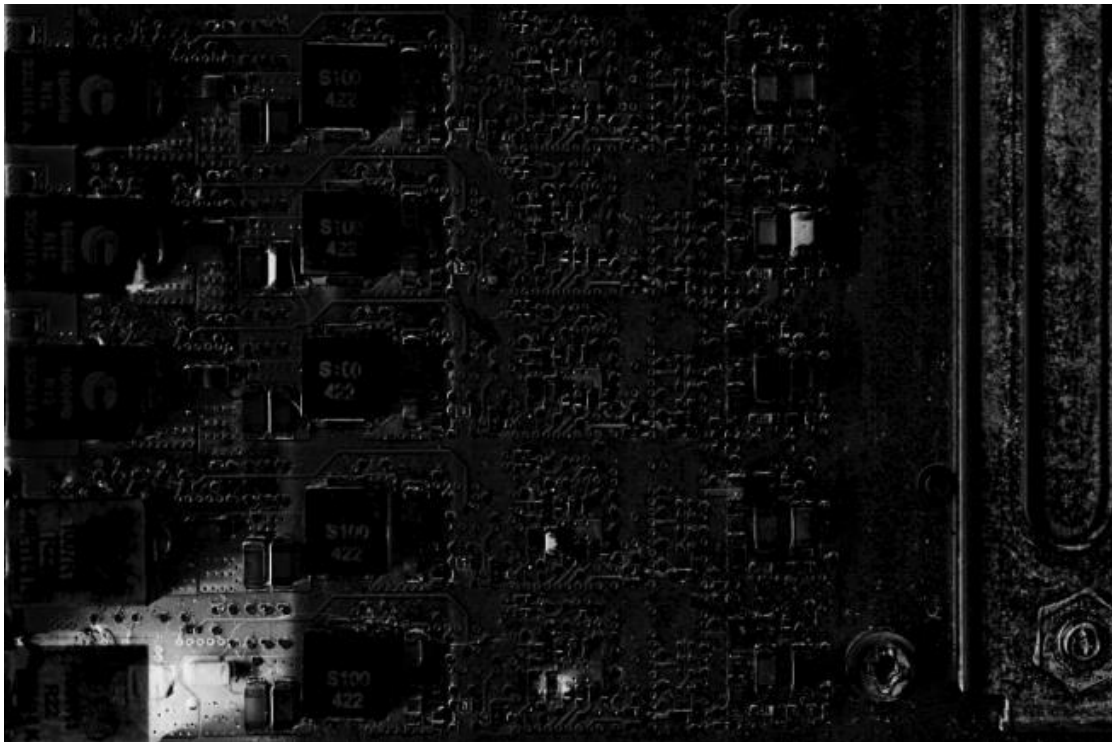


Figura 43. Resultado de la resta de intensidades de la imagen de referencia menos la imagen bajo inspección

Por su parte, en la Figura 44 se muestra la resta entre la tarjeta bajo inspección y la tarjeta de referencia ($I_{2-1} = I_{EQ_2} - I_{EQ_1}$).



Figura 44. Resultado de la resta de intensidades de la imagen bajo inspección menos la imagen de referencia

5. Almacenamiento y despliegue de imágenes. Las imágenes I_{1-2} e I_{2-1} son desplegadas y almacenadas para su análisis y uso posterior.

Las imágenes originales capturadas en formato RGB utilizaron la iluminación proveniente desde un costado y el algoritmo de análisis de sombras nos proporciona su resultado en las imágenes I_{1-2} e I_{2-1} . Al utilizar imágenes capturadas con la iluminación en el sentido opuesto se obtiene otro juego de imágenes I_{1-2} e I_{2-1} donde se pueden identificar detalles adicionales no visibles en el primer juego de imágenes.

Al sumar la intensidad de la imagen I_{1-2} obtenida con la iluminación desde un costado, a la intensidad de la imagen I_{1-2} obtenida con la iluminación desde el costado opuesto, se puede simplificar la cantidad de imágenes por analizar y de igual manera sumando las imágenes I_{2-1} respectivas.

En la Figura 45 y Figura 46 se muestra la suma de las imágenes resultantes de la iluminación opuesta. En estos ejemplos son notables algunos detalles, tales como componentes faltantes, componentes mal posicionados y daños en la tarjeta. Los detalles se encuentran señalados mediante recuadros de color naranja. Es importante considerar que al aplicar la operación de suma algunas de las áreas de las imágenes que no presentan problema pueden desviar la atención del operador del sistema debido a la acentuación de su intensidad.

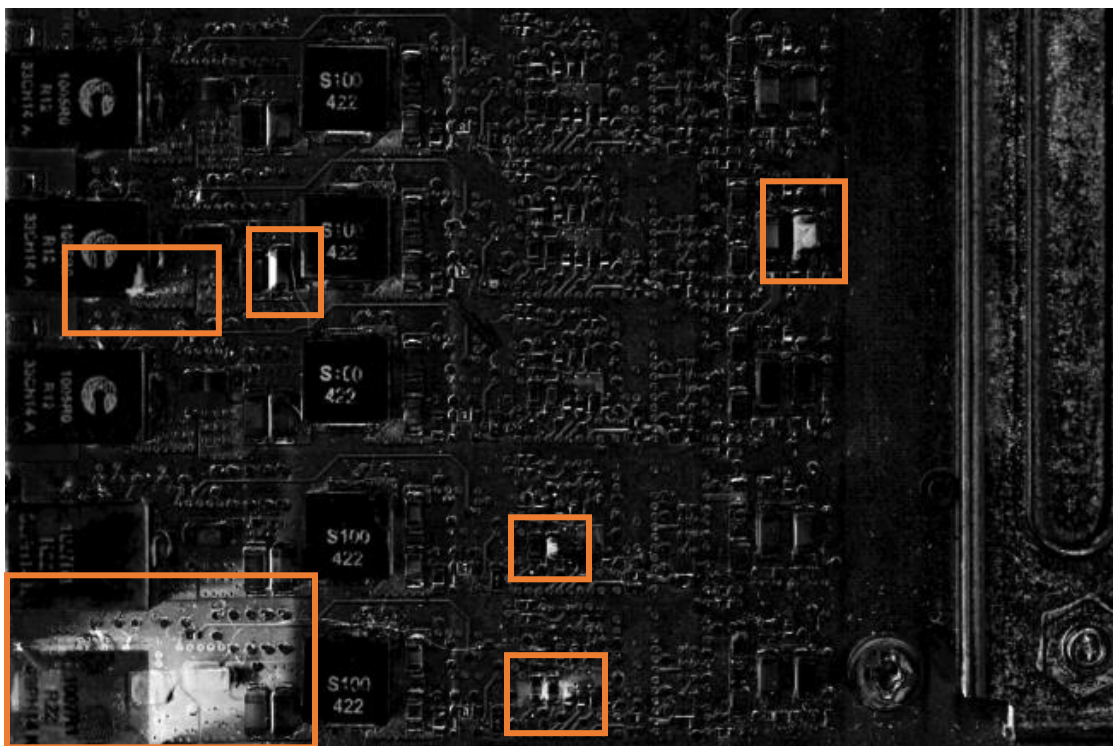


Figura 45. Suma de resultados de la resta de intensidades de la imagen de referencia menos la imagen bajo inspección, cuando se utiliza iluminación opuesta

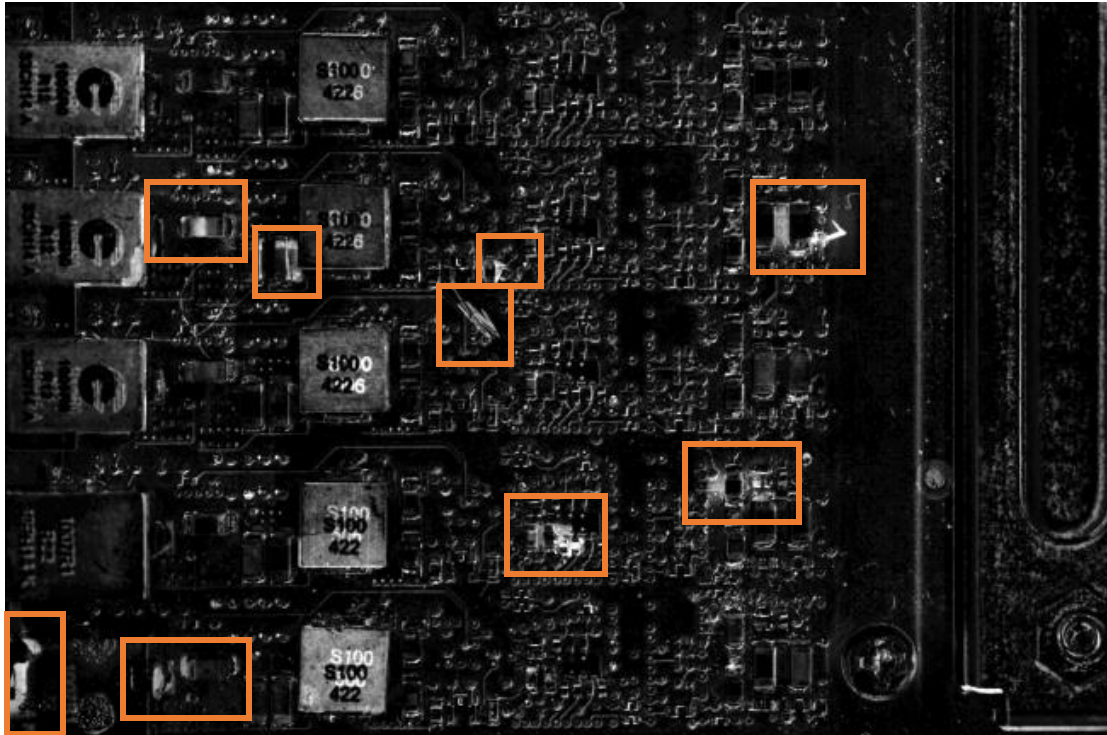


Figura 46. Suma de resultados de la resta de intensidades de la imagen bajo inspección menos la imagen de referencia, cuando se utiliza iluminación opuesta

5.7 Resultados del algoritmo para identificar zonas de interés

Tomando en cuenta las imágenes resultantes del algoritmo para el análisis de sombras, se aplicó el algoritmo para la identificación de zonas de interés descrito en la Sección 4.11 del Capítulo 4. Las imágenes resultantes se presentan en la Figura 47, en (a) se muestran los bloques de identificación de zonas de interés generados por el algoritmo sobre la imagen del análisis de sombras y en (b) se utiliza la imagen original en formato RGB con los bloques de zonas de interés en tonos de color amarillo.

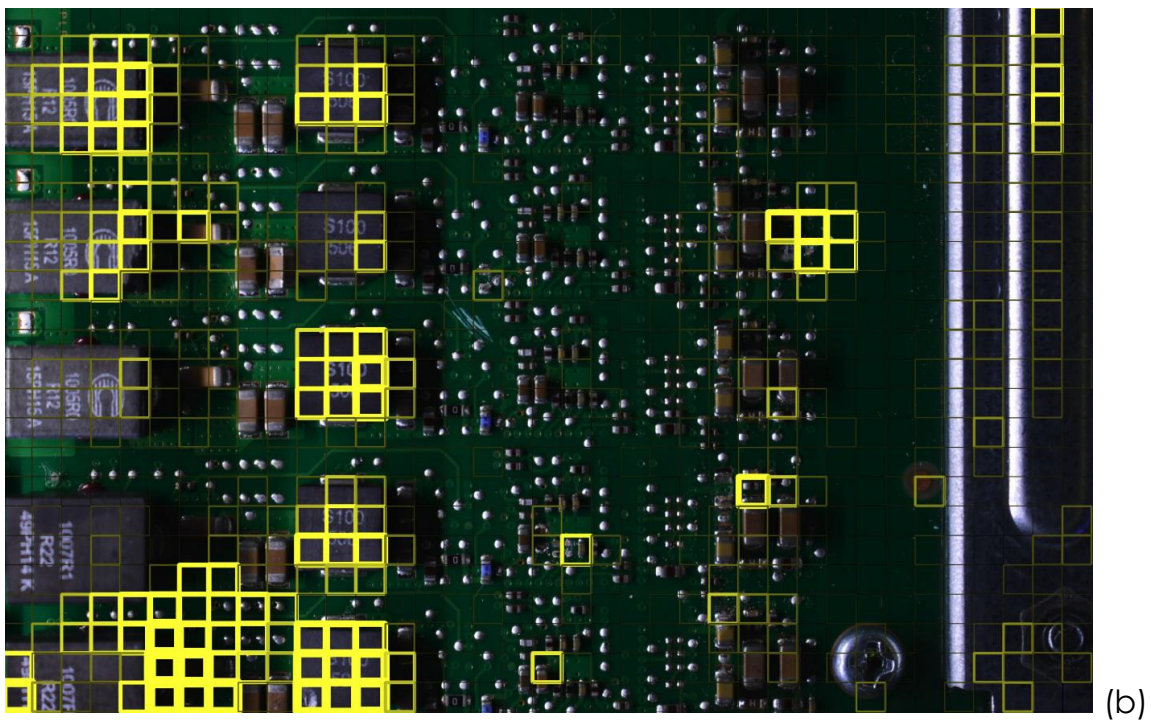
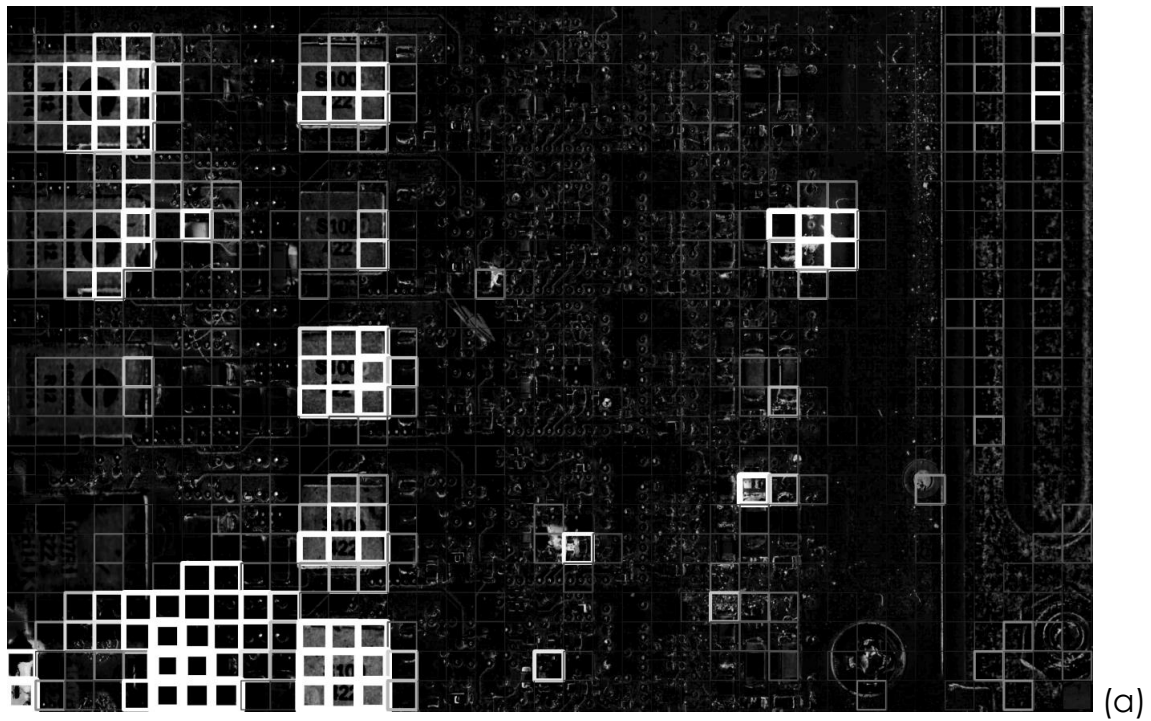


Figura 47. Bloques de zonas de interés en (a) imagen del algoritmo de sombras, (b) imagen original RGB

En la Figura 48 se muestra un acercamiento con el detalle de los bloques de zonas de interés, donde varios de ellos tienen una intensidad mínima con espesor de apenas un pixel, así como un bloque con la mayor intensidad y espesor cerca del centro de la imagen; los demás bloques tienen variaciones intermedias en su intensidad y espesor.

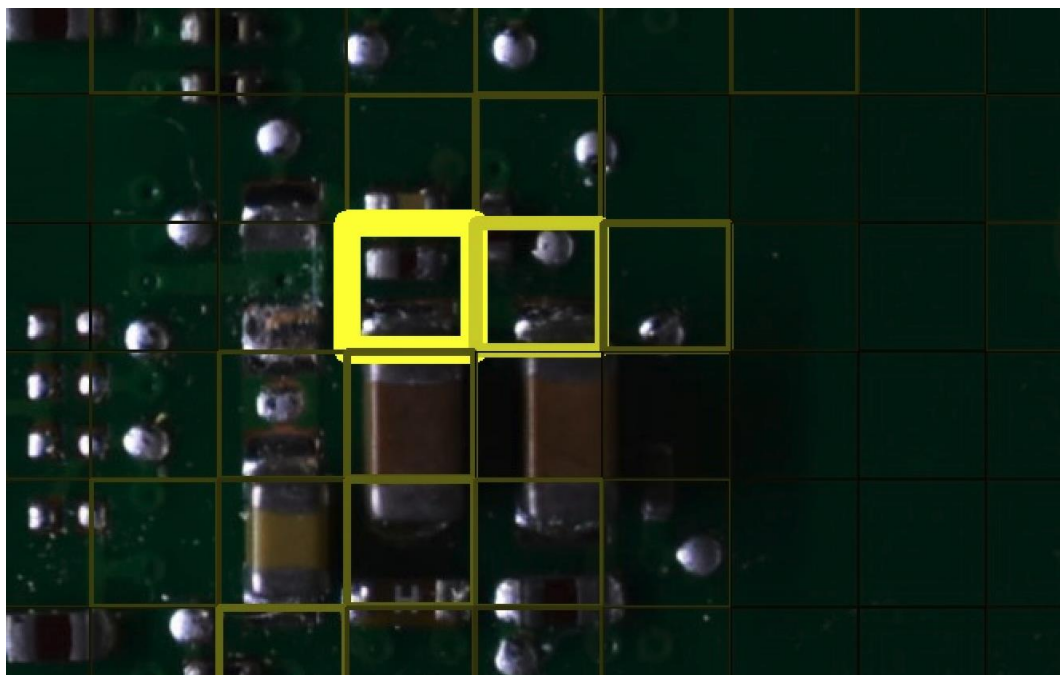


Figura 48. Detalle del espesor y color de los bloques de zonas de interés

Se realizaron pruebas con diversos tamaños del bloque y el bloque de 80×80 se comportó mejor ante la mayoría de las situaciones que se buscaron identificar.

Cabe mencionar que este algoritmo fue adaptado para identificar las diferencias de intensidad entre los bloques comparados; si dos bloques bajo comparación tienen diferencias en sus colores o contornos, pero mantienen el mismo promedio de intensidad, entonces el bloque no será señalado como área de interés, tal es el caso del bloque ubicado a la izquierda del bloque con mayor intensidad de la Figura 48, donde falta un objeto que sí está presente en la

imagen de referencia, pero dicho bloque no fue señalado como relevante por el algoritmo.

Las zonas de interés que se visualizan mediante este algoritmo sirven como un indicador adicional para que el operador del sistema analice dichas zonas, ya que éstas presentan un cambio considerable del valor de intensidad entre las tarjetas comparadas.

5.8 Consideraciones para el despliegue de resultados

La cantidad de información que nos proporcionan los distintos procedimientos o algoritmos es muy abundante y el proceso de selección sobre cuál es el que nos otorga la mejor solución es un tema que requiere de mucha exploración. Una combinación de dos o más algoritmos puede cubrir la mayoría de los problemas que se quieren identificar.

5.8.1 Combinación de canales individuales en espacio de color RGB

En este procedimiento se utilizó el par de imágenes registradas I_1 e I_2 de la Figura 27 (b) imagen de referencia y (c) imagen bajo inspección, las cuales fueron capturadas con el mayor número de fuentes de iluminación posible, para eliminar prácticamente cualquier tipo de sombra. Las imágenes permanecieron en el espacio de color BGR y se separaron sus canales B, G y R, lo que equivale a obtener tres imágenes en escala de grises para cada imagen: I_{1_B} , I_{1_G} , I_{1_R} , I_{2_B} , I_{2_G} e I_{2_R} . Posteriormente se combinaron las imágenes correspondientes a cada canal de ambas imágenes para obtener las imágenes de la Figura 49, mediante la siguiente fórmula que equivale a la distancia de color [49] para el canal 0: $I_{DIST_0} = \sqrt{(\sim I_{1_B} - I_{2_B})^2}$, donde $\sim I_{1_B}$ es el complemento de la imagen I_{1_B} , lo que equivale a la imagen en negativo; esta misma fórmula se aplicó para los canales 1 y 2.

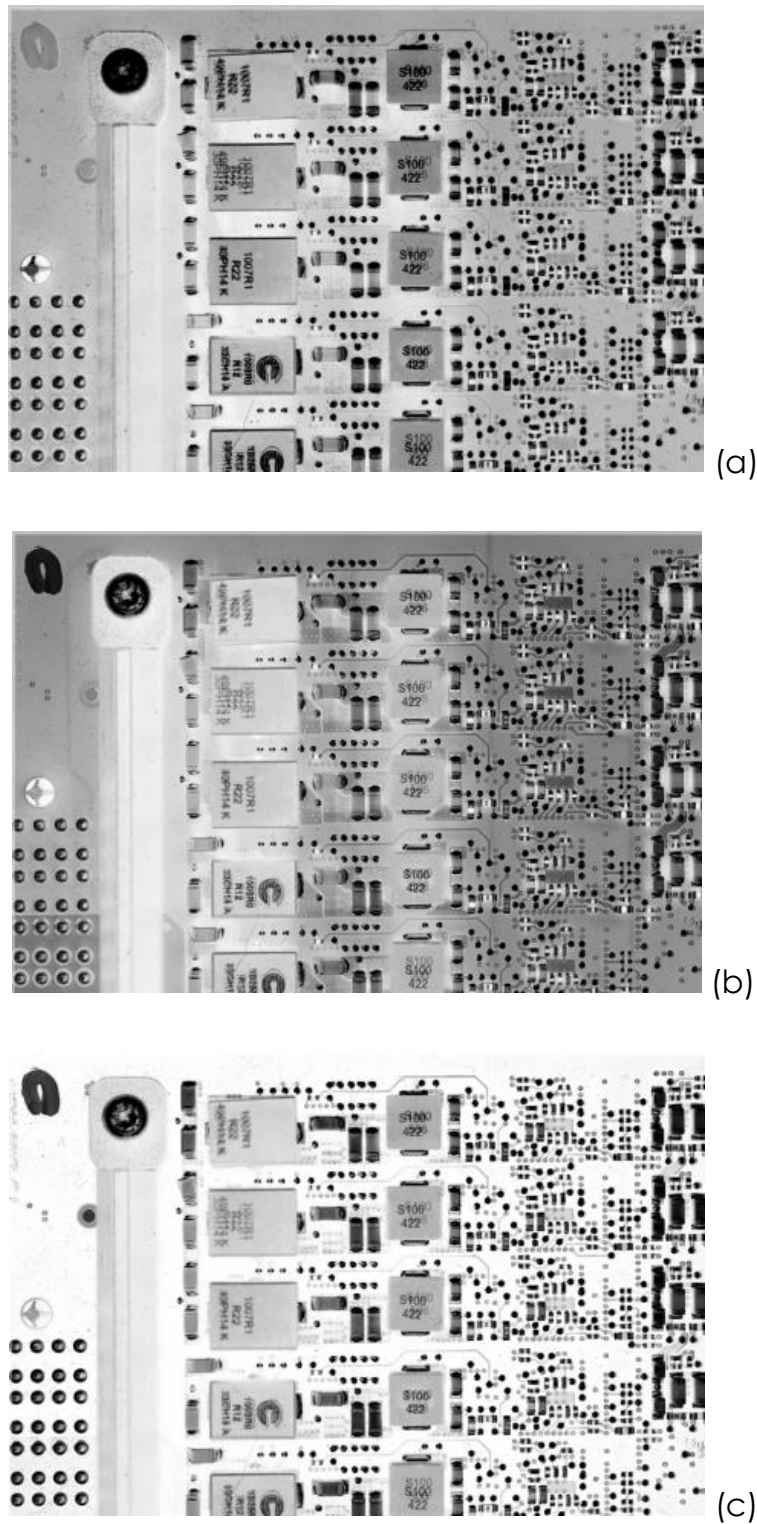


Figura 49. Combinación de canales individuales BGR de dos imágenes bajo comparación: (a) canal 0, (b) canal 1 y (c) canal 2

En las imágenes de la Figura 49 se resaltan las posiciones de los componentes y a manera de efecto de rayos X se puede identificar qué componentes presentan un desfase o giro de su posición; en algunos casos este cambio es permisible ya que el diseño lo permite, pero en otros casos puede indicar un problema ya sea de un componente mal instalado o dañado. También, se pueden apreciar las diferencias entre los textos de los componentes, los cuales pueden variar de posición de acuerdo con lo permisible del diseño, o en su contenido, dependiendo de varias consideraciones tales como el lote de producción, el proveedor y el nivel de ingeniería.

En la Figura 50 se utilizan las mismas tarjetas capturadas en la Figura 27 (b) imagen de referencia y (c) imagen bajo inspección, con la diferencia de que se utiliza una sola fuente de iluminación lateral que proyecta las sombras de los componentes hacia el lado opuesto de la lámpara; el tratamiento aplicado en la separación y combinación de cada uno de los canales es el mismo descrito para las imágenes de la Figura 49. En las imágenes de la Figura 50 se pueden identificar las áreas de las sombras representadas por las zonas más claras, que pueden llegar a resaltar mejor algunos detalles.

La combinación de canales individuales en el espacio de color RGB descrito en esta sección puede facilitar el proceso de identificación de las diferencias entre tarjetas y su uso en otros espacios de color puede aprovechar características especiales de cada canal, por ejemplo, el análisis del canal de intensidad V en el espacio de color HSV.

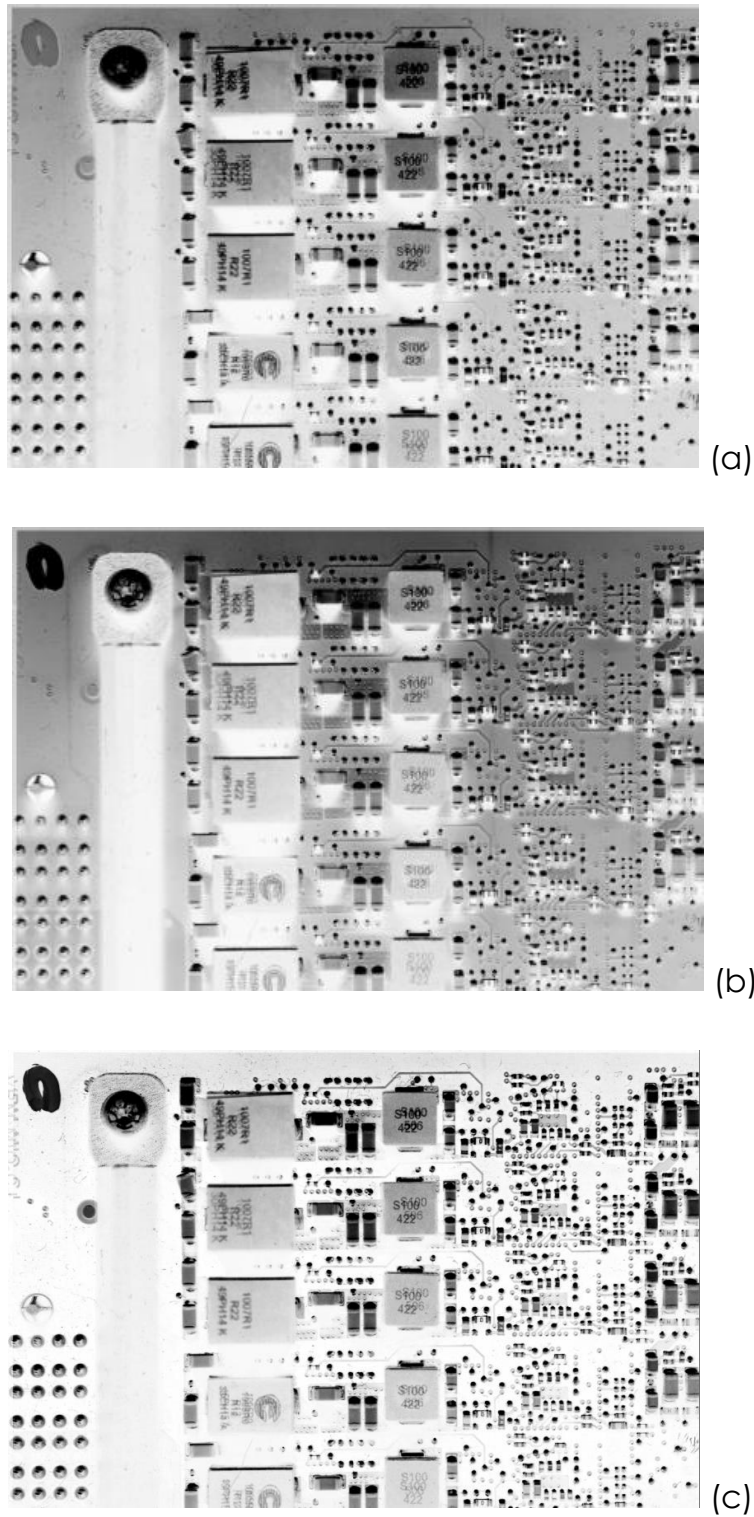


Figura 50. Combinación de canales individuales BGR de dos imágenes bajo comparación con iluminación lateral: (a) canal 0, (b) canal 1 y (c) canal 2

5.8.2 Propuesta para interfaz de usuario

En la Figura 51 se presenta una interfaz de usuario para el sistema de inspección de tarjetas electrónicas propuesto en la presente tesis.

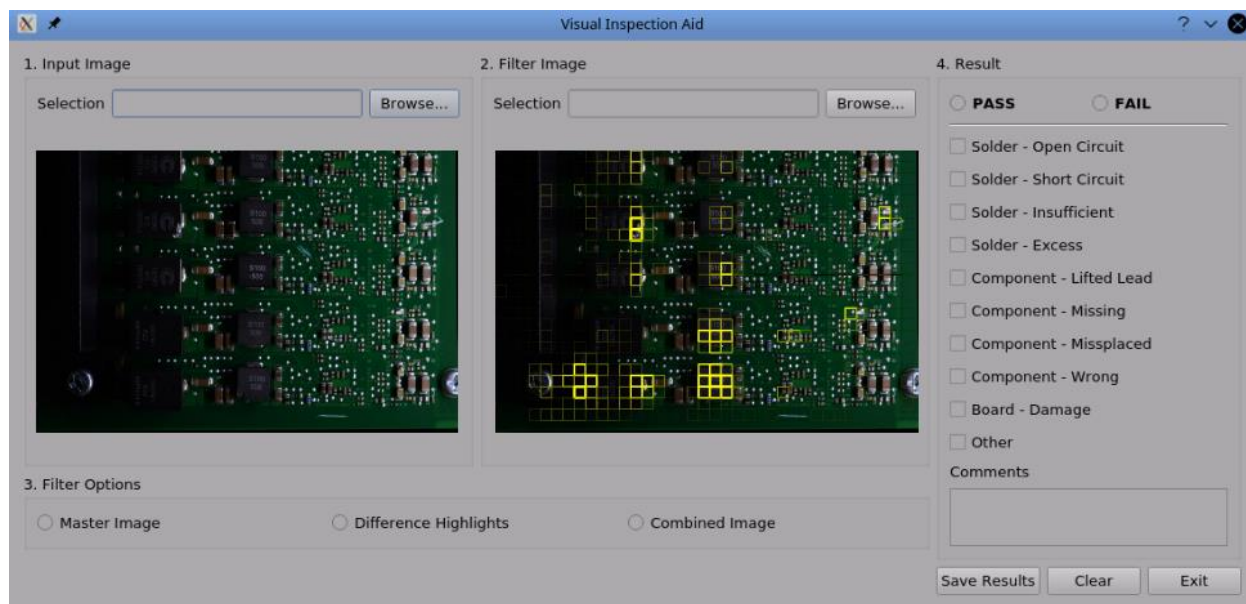


Figura 51. Interfaz de usuario propuesta para el proyecto

El diseño de la interfaz está enumerado por secciones de manera que facilita al operador la secuencia lógica de pasos a seguir. Estas son las principales características consideradas para cada sección:

1. *Input Image* (imagen de entrada) contiene un botón (*Browse...*) para elegir y cargar la imagen de referencia que será desplegada en el panel izquierdo, justo debajo de la ruta del archivo (*Selection*).
2. *Filter Image* (imagen a filtrar) contiene un botón (*Browse...*) para elegir y cargar la imagen bajo inspección que será desplegada en el panel derecho, también debajo de la ruta del archivo (*Selection*).

3. *Filter Options* (opciones de filtrado) muestra las opciones de filtrado que se pueden aplicar a la imagen de la segunda sección, por ejemplo, desplegar la imagen original sin filtrar (*Master Image*), resaltar las diferencias entre las dos imágenes (*Difference Highlights*) o mostrar una combinación de ambas imágenes (*Combined Image*).
4. *Result* (resultado) contiene en la parte superior el resultado de la inspección para las tarjetas consideradas, ya sea pasa o falla (PASS / FAIL); en el área central de la sección contiene las opciones de fallas o defectos encontrados en la tarjeta bajo inspección, donde se pueden seleccionar una o varias opciones en caso de que la opción FAIL haya sido seleccionada, seguido de un campo de texto para ingresar comentarios opcionales (*Comments*); no es necesario ingresar comentarios si la opción PASS ha sido seleccionada. En la parte inferior se localizan los botones para almacenar los resultados de la inspección (*Save Results*), limpiar las opciones seleccionadas para iniciar una nueva inspección o corregir la información (*Clear*) y el botón para salir de la interfaz (*Exit*).

El diseño e información de la interfaz se puede ajustar según sea la necesidad de los usuarios, por ejemplo, se puede agregar la opción para elegir la combinación de algoritmos a utilizar en el análisis; también se puede desplegar una secuencia de las distintas imágenes resultantes del proceso de inspección en forma automática, facilitando la visualización al operador para la identificación de áreas con problemas potenciales.

La interfaz aquí presentada se diseñó con el software de ambiente de trabajo *Qt Creator (Community)* 4.5.1 para Linux, basada en *Qt* 5.10.1 [50]; existen varias alternativas para el diseño e implementación de interfaces gráficas de usuario, tales como *GTK+*, *Nana C++ Library* y *TK*, por mencionar algunas [51].

5.9 Evaluación del análisis experimental de algoritmos

5.9.1 Facilidad de reconocimiento de defectos por un operador

Para evaluar los diversos algoritmos de detección de fallas o defectos en las tarjetas electrónicas se identifican los grupos de daños comunes que los algoritmos a analizar pueden identificar. Posteriormente, se eligen pares de tarjetas electrónicas similares donde una es la tarjeta de referencia y la otra la tarjeta bajo inspección. Se realizan capturas de imágenes con las distintas condiciones de iluminación y se contabiliza la totalidad de los defectos conocidos presentes en las tarjetas a inspeccionar. Un operador del sistema identificará los defectos resaltados por cada uno de los algoritmos y calificará la facilidad de reconocerlos como 'alta', 'media' o 'baja' en base al tiempo y esfuerzo dedicado para cada caso. Al final se contabiliza la totalidad de los casos y se asigna un porcentaje a la facilidad de reconocimiento (alta, media, baja) para cada uno de los algoritmos, para así evaluar su efectividad.

5.9.2 Evaluación de los algoritmos propuestos para el reconocimiento de defectos

En la Figura 18 al inicio del Capítulo 4 se presentaron algunas fallas o defectos que se pueden detectar en las tarjetas electrónicas. Para poder comparar los algoritmos de análisis de colores, contornos y sombras descritos en el Capítulo 4 se identificaron los grupos de daños comunes que pueden ser identificados por un operador.

Se utilizaron 8 tarjetas electrónicas, donde 4 de ellas fungieron como las tarjetas de referencia y las otras 4 como las tarjetas bajo inspección. Se realizaron varias capturas de imágenes para las 8 tarjetas bajo diversas condiciones de iluminación; posteriormente se contabilizaron todas las fallas y defectos ya

conocidos que estaban presentes en todas las tomas para cada una de las 4 tarjetas bajo inspección, para contabilizar un total de 65 defectos.

En la Tabla 3 se presenta la facilidad con que un operador pudo reconocer los defectos contabilizados al observar las imágenes resultantes de cada uno de los algoritmos. La facilidad se calificó como 'alta' cuando el operador identificó fácilmente el defecto ya sea por los colores, contornos o sombras/reflejos presentes en las imágenes, 'media' cuando pudo identificar los defectos, pero tuvo que dedicar más tiempo y/o esfuerzo para identificarlos y 'baja' cuando el defecto no se hizo presente en las imágenes generadas por el algoritmo.

Tabla 3. Facilidad de identificación visual con los diversos algoritmos

Algoritmo de color (1)		Facilidad de identificación visual		
Defecto		Alta	Media	Baja
Daño - Componente		10	0	0
Daño - Desprendimiento		3	1	1
Daño - Componente Faltante		19	16	0
Daño - Rayón en Tarjeta		11	2	2
Total individual:		66.15%	29.23%	4.62%
Total alta + media:		95.38%		

Algoritmo de contornos (2)		Facilidad de identificación visual		
Defecto		Alta	Media	Baja
Daño - Componente		7	1	2
Daño - Desprendimiento		3	1	1
Daño - Componente Faltante		21	11	3
Daño - Rayón en Tarjeta		2	0	13
Total individual:		50.77%	20.00%	29.23%
Total alta + media:		70.77%		

Algoritmo de sombras (3)		Facilidad de identificación visual		
Defecto		Alta	Media	Baja
Daño - Componente		5	4	1
Daño - Desprendimiento		4	0	1
Daño - Componente Faltante		26	2	7
Daño - Rayón en Tarjeta		12	3	0
Total individual:		72.31%	13.85%	13.85%
Total alta + media:		86.15%		

En la Tabla 3 se aprecia que el algoritmo de sombras es el que ofrece la más 'alta' facilidad para que un operador detecte los defectos en las tarjetas electrónicas con un 72.31%, seguido por el algoritmo de color con un 66.15% y el algoritmo de contornos al final con un 50.77%. Al observar la facilidad 'media' se aprecia que el algoritmo de color es superior con un 29.23%, seguido por el algoritmo de contornos con un 20% y el algoritmo de sombras con un 13.85%; es conveniente considerar la suma de la facilidad 'alta' y 'media' para cada algoritmo, de manera que se pueda apreciar el nivel de detección alcanzado para estos dos casos: el algoritmo de color contabiliza un 95.38% al considerar la facilidad 'alta' y 'media', mientras que el algoritmo de sombras alcanza un 86.16% y el algoritmo de contornos logra un 70.77%.

Al realizar una evaluación global combinando los resultados de los tres algoritmos se observa que para todos los casos siempre hay al menos un algoritmo que ofrece una facilidad 'alta' para la detección del defecto, por lo que se alcanza el 100% de cubrimiento con dicha facilidad, y si solo se combinan los dos algoritmos con mejor desempeño (el de análisis de color y análisis de sombras) se alcanza poco más del 92% de casos identificados con una facilidad 'alta' de detección y todo el remanente de los casos cumple con una facilidad 'media' de detección. La evaluación global ofrece un muy buen desempeño, por debajo del objetivo del 15% de defectos reales incorrectamente verificados.

5.9.3 Descripción de la prueba de diagnóstico para la identificación de zonas de interés

Para evaluar el algoritmo de identificación de zonas de interés en la detección de fallas o defectos se seleccionan pares de tarjetas donde una se identifica como la tarjeta de referencia (sin defectos) y la otra como la tarjeta bajo inspección; para ambas tarjetas se identifican las diferencias entre ellas y se documentan previo a la inspección con el algoritmo. Al realizar la inspección mediante el sistema se contabilizan las diferencias que han podido ser resaltadas (áreas o grupos de píxeles), así como las que no pudieron ser resaltadas, para obtener el porcentaje de aciertos sobre el total de casos.

Para evaluar el algoritmo se realiza una decisión binaria con cuatro posibilidades resumidas en la Tabla 4, donde se hace un diagnóstico de prueba [52] para las fracciones de verdaderos positivos (VP, identificación de un problema cuando éste existe), falsos positivos (FP, identificación de un problema cuando no lo hay), falsos negativos (FN, se descarta un problema cuando éste existe) y verdaderos negativos (VN, se descarta un problema cuando no lo hay).

Tabla 4: Prueba de diagnóstico para VP, FP, FN y VN

		Problema	
		Presente	Ausente
Respuesta del operador	Positivo	VP	FP
	Negativo	FN	VN

Los casos deseables son los verdaderos positivos (VP) y verdaderos negativos (VN) ya que éstos consisten en un diagnóstico correcto del problema o la

ausencia de éste, por el contrario, un falso positivo (*FP*) identifica un problema donde no lo hay; si no existe una segunda validación del falso positivo se está ante una situación donde se descarta producto bueno (*overkill*). El peor de los casos es un falso negativo (*FN*), ya que el operador al calificarlo como producto bueno cuando potencialmente no lo es, representa un riesgo de falla o reclamo de cliente.

Existen cuatro índices de diagnóstico que caracterizan que tan correctas son las respuestas sobre la clasificación [52]: sensibilidad *Se*, especificidad *Sp*, *VPP* (valor predictivo positivo, en inglés: *positive predictive value*) y *VPN* (valor predictivo negativo, en inglés: *negative predictive value*), los cuales se definen mediante las Ecuaciones 16, 17, 18 y 19, donde sus valores fluctúan entre 0 y 1.

$$Se = \frac{VP}{VP + FN}$$
(16)

$$Sp = \frac{VN}{VN + FP}$$
(17)

$$VPP = \frac{VP}{VP + FP}$$
(18)

$$VPN = \frac{VN}{VN + FN}$$
(19)

La prueba de sensibilidad [53] es la capacidad para identificar de manera correcta un problema (tasa de verdaderos positivos) y la prueba de especificidad [53] es la capacidad de identificar de manera correcta donde efectivamente no hay un problema (tasa de verdaderos negativos); ambas pruebas se utilizan de manera extensa en el área de diagnóstico de enfermedades [53].

El valor predictivo positivo [54] es la probabilidad de que los elementos identificados como positivos en realidad tienen el problema, mientras que el valor predictivo negativo [54] es la probabilidad de que los elementos identificados como negativos en efecto no tienen un problema.

5.9.4 Evaluación de la prueba de diagnóstico para la identificación de zonas de interés

Se aplicó la prueba de diagnóstico al algoritmo de identificación de zonas de interés de la siguiente manera:

1. En la imagen resultante del algoritmo para las tarjetas bajo inspección se consideraron 69 zonas de interés donde existe uno o varios bloques agrupados y con el contorno resaltado, así como 6 zonas que no fueron resaltadas por el algoritmo y tienen un problema conocido.
2. Dado que el algoritmo puede identificar diferencias de intensidad entre bloques o grupos de bloques, pero no puede distinguir si hay un problema real o no, el operador del sistema se encargó de calificar cada zona identificada con verdadero o falso.
3. Se asignó la calificación de verdadero positivo (VP) a las zonas identificadas por el algoritmo donde el operador las calificó como positivo y efectivamente hay un problema real.

4. Se asignó la calificación de falso positivo (*FP*) a las zonas identificadas por el algoritmo donde el operador las calificó como positivo, pero en realidad no existe un problema.
5. Se asignó la calificación de falso negativo (*FN*) a las zonas donde existe un problema real y que el algoritmo no fue capaz de identificarlas debido a que no hubo una diferencia de intensidad relevante entre las imágenes bajo comparación.
6. Se asignó la calificación de verdadero negativo (*VN*) a las zonas identificadas por el algoritmo donde el operador las calificó como negativo y efectivamente no hay un problema real.

En la Tabla 5 se muestran los resultados de la prueba de diagnóstico con las consideraciones previas.

Tabla 5: Resultados de la prueba de diagnóstico para VP, FP, FN y VN

		Problema	
		Presente	Ausente
Respuesta del operador	Positivo	VP = 36	FP = 9
	Negativo	FN = 6	VN = 24

Tomando en cuenta las Ecuaciones 16, 17, 18 y 19, y utilizando los valores de la Tabla 5, se obtienen los resultados en las Ecuaciones 20, 21, 22 y 23, para la sensibilidad (*Se*), especificidad (*Sp*), valor predictivo positivo (*VPP*) y valor predictivo negativo (*VPN*) respectivamente.

$$Se = \frac{VP}{VP + FN} = 0.86$$

(20)

$$Sp = \frac{VN}{VN + FP} = 0.73$$

(21)

$$VPP = \frac{VP}{VP + FP} = 0.80$$

(22)

$$VPN = \frac{VN}{VN + FN} = 0.80$$

(23)

La prueba nos muestra una sensibilidad del 86%, es decir, la capacidad para identificar de manera correcta un problema, una especificidad del 73%, que es la capacidad de identificar de manera correcta donde efectivamente no hay un problema; también nos arroja un valor predictivo positivo de 0.80 y un valor predictivo negativo de 0.80.

5.10 Tiempos de ejecución

Como parte del diseño del sistema de visión propuesto se debe contemplar el tiempo de ejecución de las distintas etapas que lo conforman para determinar el tiempo de procesamiento total requerido para la inspección de una tarjeta electrónica.

En la Tabla 6 se muestran los tiempos de duración en segundos para la ejecución de los distintos pasos del proceso del sistema de visión; en los dos primeros renglones de la tabla se presentan las características de las imágenes de color capturadas con el sistema de adquisición de imágenes, así como el tamaño del bloque a procesar para el algoritmo de identificación de zonas de interés.

Tabla 6: Resultados de los tiempos de ejecución en segundos del sistema de visión

Tamaño de la imagen en pixeles	2992 x 2000
Tamaño de la zona de interés en pixeles	80 x 80
Captura de imágenes	2.00
Eliminación del fondo	0.94
Registro entre imágenes	1.47
Algoritmo de colores*	3.89
Algoritmo de contornos*	3.48
Algoritmo de sombras*	1.90
Algoritmo de zonas de interés*	67.09
Tiempo total en segundos	80.77

*Incluye despliegue de imágenes

Los tiempos medidos son el resultado de varias observaciones y no contemplan el tiempo de montaje de la tarjeta en la estación de inspección. El tiempo de captura para una imagen se estima de un segundo que incluye el tiempo de espera para la estabilización de la iluminación y teniendo la cámara digital lista y configurada para tomar la fotografía.

Si el procedimiento de inspección para un modelo de tarjeta en particular se prepara para realizar tomas de imágenes con distintas configuraciones de iluminación se deben considerar los tiempos adicionales para la captura y procesamiento de dichas imágenes.

Para un sistema AOI comercial se encuentra que el tiempo de inspección ronda un segundo por cada 5 pulgadas cuadradas [55], lo cual equivale a realizar la

inspección del área de una tarjeta contemplada por esta tesis en un lapso de 1 a 2 segundos, sin embargo, no se especifican las condiciones de dicha inspección. Si se consideran los siguientes pasos: captura de una imagen, registro entre imágenes y algoritmo de sombras, se obtiene un tiempo de ejecución de 3 segundos aproximadamente con el sistema aquí propuesto, todavía sin realizar una optimización e integración formal.

Con la medición del tiempo de procesamiento durante la etapa de diseño se puede planificar el volumen de tarjetas que se pueden inspeccionar en condiciones normales. Cabe mencionar que es importante considerar además el tiempo requerido para el mantenimiento y depuración del sistema, de manera que se pueda tener una mejor planificación para su uso en un proceso de manufactura.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones de la tesis, se enlistan las contribuciones y productos logrados y se plantea el trabajo futuro para este trabajo de investigación. Por último, se enlistan las referencias utilizadas en la tesis.

6.1 Conclusiones del proyecto

El problema estudiado en la tesis fue la inspección de tarjetas electrónicas en un área de manufactura cuando se presentan escapes de defectos por la falta de experiencia del operador o por fatiga visual, para lo cual se propuso un sistema para la inspección visual de tarjetas electrónicas que brinda apoyo a los operadores que realizan la inspección, de manera que, al señalar las diferencias en la tarjeta electrónica bajo inspección respecto a una tarjeta de referencia, les permite identificar daños o defectos para decidir la disposición de la tarjeta bajo inspección. El sistema de visión propuesto, alternativo al de los sistemas de inspección automatizada (AOI), es económico en su implementación al utilizar código de fuente abierta, además de ofrecer información valiosa al operador del sistema para la toma de decisiones sobre la tarjeta bajo inspección.

El sistema de visión incluye un método que considera tres algoritmos que permiten efectuar distintos tipos de análisis (color, contorno y sombra) sobre las imágenes de las tarjetas para identificar defectos potenciales durante el proceso de inspección. También, se propuso un algoritmo para identificar zonas de interés dentro de la tarjeta, las cuales permiten centrar la atención del operador para identificar fallas o problemas potenciales, así como una propuesta de interfaz para usuarios, además de un prototipo para la captura de imágenes digitales que se encuentra en proceso de ser patentado.

En los tres algoritmos descritos se determinó la facilidad de reconocimiento de defectos para extraer información que permite a un operador identificar con mayor facilidad los daños potenciales en las tarjetas electrónicas, considerando la facilidad 'alta' y 'media' para identificar las zonas afectadas. El orden de efectividad de los algoritmos colocó al análisis de color en primer lugar con un 95.38%, en segundo lugar, con 9.22% menor efectividad que el análisis de color, se situó al análisis de sombras y, en tercer lugar, se situó al análisis de contornos con 24.61% menor efectividad que el análisis de color. Es de notar que si solo se considera la facilidad 'alta' para identificar daños el algoritmo de análisis de sombras es superior pues alcanzó 72.31% contra 66.15% del algoritmo de análisis de color. Probablemente, esto se debe a que la simplificación de las imágenes de color a escala de grises hace más fácil para el operador la identificación de defectos, en especial porque la iluminación lateral en varias de las imágenes genera áreas de contraste de luz y sombra que resaltan las zonas de interés.

El sistema de visión propuesto permite la detección de fallas por daños a componentes, desprendimiento y mala ubicación de componentes, componentes faltantes y rayones en la tarjeta. El sistema alcanza una precisión entre 66% y 95% utilizando el análisis por color, entre 50% y 70% empleando el análisis por contornos y entre 72% y 86% mediante el análisis por sombras. Los algoritmos propuestos en dichos análisis se pueden complementar para mejorar la precisión global y ofrecer una solución más robusta al problema de inspección abordado; al combinar los algoritmos de color y sombras se obtiene una precisión entre 92% y 100%, donde el nivel de precisión inferior es mucho mejor que cuando solo se utiliza el algoritmo de color y cuando se realiza la evaluación global combinando los tres algoritmos se alcanza una precisión del 100%, ya que para todos los casos considerados siempre hay al menos un algoritmo que ofrece una facilidad 'alta' para la detección del defecto; con esto se puede confirmar

que la evaluación global ofrece un muy buen desempeño, por debajo del objetivo del 15% planteado.

En la prueba de diagnóstico realizada al algoritmo de identificación de zonas de interés utilizando el algoritmo de análisis de sombras, se pudo observar que la sensibilidad o capacidad para identificar de manera correcta un problema es del 86% (tasa de verdaderos positivos); en cuanto a la especificidad o capacidad de identificar de manera correcta donde efectivamente no hay un problema es del 73% (tasa de verdaderos negativos). El valor predictivo positivo es de 0.80 (probabilidad de acertar cuando hay problemas); y el valor predictivo negativo también es de 0.80 (probabilidad de acertar cuando no hay problemas).

La facilidad de reconocer áreas potencialmente problemáticas con uno o varios de los algoritmos propuestos eleva la oportunidad de conseguir mejores resultados en la inspección visual de tarjetas electrónicas en el área de *POWER Systems*. Al señalar las zonas de interés de la tarjeta bajo inspección se le dan más pistas al operador del sistema propuesto para enfocar su atención. De hecho, con la combinación de dos de los algoritmos, análisis de color y análisis de sombras, se cubre más del 90% de las zonas que el operador debe considerar, donde se encuentran defectos potenciales así como las áreas que no tienen problemas pero en las cuales los algoritmos detectaron ciertas diferencias; un aprendizaje valioso logrado durante el desarrollo de la tesis fue el entender cómo la visualización de las imágenes en distintos espacios de color y el procesamiento y análisis de datos en canales específicos pueden facilitar todavía más la identificación de los problemas al operador.

Cabe mencionar que el algoritmo de análisis de color presenta una ventaja que supera a los demás algoritmos propuestos: la identificación de rayones y marcas extrañas en las tarjetas. Prácticamente el 100% de los casos analizados fueron

detectados por este algoritmo, mientras que el análisis de contornos y sombras en muy rara ocasión fueron capaces de detectarlos debido a la naturaleza de estos defectos, que prácticamente no tienen volumen y es poco probable que proyecten una sombra. Los defectos de rayones y marcas se removieron de la comparación entre algoritmos para tener un mejor equilibrio en el análisis.

Con el sistema de visión propuesto se puede ver un desempeño similar al de un sistema AOI comercial (considerando la etapa de inspección y no la automatización) pues presenta menos de un 15% de defectos reales incorrectamente verificados mediante la combinación de uno o varios de los algoritmos descritos; pero al considerar los costos de adquisición y mantenimiento de un sistema AOI comercial (alrededor de *USD\$30,000* dólares) contra el sistema desarrollado de manera interna con componentes de uso comercial, con uso de software de fuente abierta y total control de las características de funcionamiento del sistema, así como de las implementaciones o cambios a futuro que pueden fluctuar entre *USD\$1,500* y *USD\$9,000* dólares según sus características, el sistema desarrollado se presenta como una opción muy viable para implementar una solución que robustezca el proceso de inspección para reducir los escapes potenciales a Clientes.

En cuanto a los tiempos de ejecución medidos para cada paso del proceso, éstos son el resultado de bloques de código que se han preparado y ejecutado por separado; la integración y depuración de dichos bloques en efecto reduce los tiempos de procesamiento ya que se evita la inicialización de cada programa y actividades como cargar imágenes múltiples veces. Aunque el tiempo de ejecución no es tan bueno como el de un sistema AOI comercial se trabajará en la optimización de los algoritmos y la integración de los pasos para mejorar el tiempo de ejecución total.

En general, el sistema de visión propuesto cubre las ventajas planteadas previamente: precisión equiparable a un sistema AOI con un buen tiempo de ejecución, costo más accesible y control sobre su diseño; el sistema desarrollado además requiere del involucramiento de personal que vería incrementadas sus capacidades técnicas y su implementación nos daría valor agregado al competir con una solución innovadora dentro de la compañía y a nivel global, de la cual se pueden desprender nuevos proyectos de visión por computadora.

6.2 Aportación de la tesis

Las aportaciones de la tesis son:

- Desarrollo de un método que utiliza un algoritmo para la comparación de imágenes de tarjetas electrónicas basado en colores (presentado en la Sección 4.7).
- Desarrollo de un método que utiliza un algoritmo para la comparación de imágenes de tarjetas electrónicas basado en contornos (presentado en la Sección 4.8).
- Desarrollo de un método que utiliza un algoritmo para la comparación de imágenes de tarjetas electrónicas basado en sombras (presentado en la Sección 4.9).
- Desarrollo de un método que utiliza un algoritmo para la identificación de zonas de interés que considera los resultados del algoritmo basado en sombras (presentado en la Sección 4.11).

6.3 Patente en trámite

El prototipo de captura de imágenes digitales utilizado en esta tesis es material confidencial que ha sido sometido para una patente y actualmente se encuentra en proceso de aprobación.

6.4 Trabajo Futuro

El tema de inspecciones de calidad es extenso y de él se pueden derivar nuevos requerimientos específicos, así como nuevas soluciones utilizando la gran cantidad de algoritmos de visión disponibles.

Como trabajo futuro se proponen las siguientes líneas que involucran solo el procesamiento y análisis de las imágenes ya capturadas y pre-procesadas:

1. Adaptar el algoritmo de identificación de zonas de interés a los algoritmos para el análisis de colores y contornos.
2. Realizar el análisis del texto impreso en la tarjeta electrónica, así como sus componentes, de manera que se pueda hacer una comparación más profunda que considere la información que tienen registrada los componentes y la tarjeta.
3. Utilizar técnicas de '*machine learning*' para que el sistema sea capaz de distinguir defectos reales de falsos positivos.
4. Optimizar e integrar los algoritmos para mejorar el tiempo de ejecución, en particular el algoritmo de identificación de zonas de interés.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Prateek, J., Millán, D. Godoy, V.** *OpenCV By Example*. UK : Packt Publishing, 2016. p. 296.
- [2] **Yoshizawa, Toru.** *Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications*. 2nd Edition. Boca Raton, FL : CRC Press, 2015. p. 919.
- [3] **Janóczki, M. et al.** Automatic Optical Inspection of Soldering, Materials Science - Advanced. [Online] InTech, 2013. [Cited: September 26, 2017.] <https://www.intechopen.com/books/materials-science-advanced-topics/automatic-optical-inspection-of-soldering>.
- [4] **Edmund Optics, Inc.** Illumination. [Online] 2017. [Cited: October 17, 2017.] <https://www.edmundoptics.com/illumination/>.
- [5] **Pajankar, Ashwin.** *Raspberry Pi Computer Vision Programming*. UK : Packt Publishing, 2015. p. 178.
- [6] **Edmund Optics, Inc.** Imaging Electronics 101: Understanding Camera Sensors for Machine Vision Applications. [Online] 2017. [Cited: October 17, 2017.] <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/imaging/understanding-camera-sensors-for-machine-vision-applications/>.
- [7] **Jackson, Wallace.** *Digital Image Compositing Fundamentals*. New York : Apress, 2015.
- [8] **Hirsch, R., and Erf, G.** *Light and Lens, Photography in the Digital Age*. 2nd Edition. Oxford : Focal Press, 2012.
- [9] **Inc., Nikon.** Nikon D3400 DSLR Camera | Interchangeable Lens DSLR Camera with SnapBridge Connectivity. [Online] 2017. [Cited: August 20, 2017.] <http://www.nikonusa.com/en/nikon-products/product/dslr-cameras/d3400.html>.
- [10] **Edmund Optics, Inc.** 5 Fundamental Parameters of an Imaging System. [Online] 2017. [Cited: October 16, 2017.] <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/imaging/5-fundamental-parameters-of-an-imaging-system/>.
- [11] —. Imaging System Parameter Calculator. [Online] 2017. [Cited: October 17, 2017.] <https://www.edmundoptics.com/resources/tech-tools/imaging-system-parameter-calculator/>.
- [12] —. Resolution. [Online] 2017. [Cited: October 17, 2017.] <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/imaging/resolution/>.
- [13] **Corporation, Nikon.** AF-P DX NIKKOR 18–55mm f/3.5–5.6G VR Lenses. [Online] 2019. [Cited: January 12, 2019.] https://onlinemanual.nikonimglib.com/d3500/en/17_kit_lenses_01.html.

- [14] **Edmund Optics, Inc.** Object Space Resolution. [Online] 2017. [Cited: October 17, 2017.] <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/imaging/object-space-resolution/>.
- [15] —. LED Illumination. [Online] 2017. [Cited: October 17, 2017.] <https://www.edmundoptics.com/illumination/led-illumination/>.
- [16] —. Fiber Optic Illumination. [Online] 2017. [Cited: October 17, 2017.] <https://www.edmundoptics.com/illumination/fiber-optic-illumination/>.
- [17] —. Fluorescent Illumination. [Online] 2017. [Cited: October 17, 2017.] <https://www.edmundoptics.com/illumination/fluorescent-illumination/>.
- [18] **Beyeler, Michael.** *OpenCV with Python Blueprints*. Birmingham : Packt Publishing, 2015. p. 230.
- [19] **Mallick, Satya.** Why does OpenCV use BGR color format? [Online] Sep 27, 2015. <https://www.learnopencv.com/why-does-opencv-use-bgr-color-format/>.
- [20] **Marta Mrak, Rafal Mantiuk, Patrick Le Callet, Frédéric Dufaux.** Color Management in HDR Imaging. *High Dynamic Range Video*. London, UK : Academic Press, 2016.
- [21] **OpenCV.** Camera Calibration. [Online] December 18, 2015. [Cited: November 13, 2017.] https://docs.opencv.org/3.1.0/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html.
- [22] **Kaehler, Adrian and Bradski, Gary.** *Learning OpenCV 3*. Sebastopol, CA : O'Reilly Media, Inc., 2016. p. 1024.
- [23] **García, Gloria Bueno, et al.** *Learning Image Processing with OpenCV*. Birmingham : Packt Publishing, 2015. p. 232.
- [24] **Howse, J., Joshi, P., Beyeler, M.** *OpenCV: Computer Vision Projects with Python*. Birmingham, UK : Packt Publishing, 2016. p. 558.
- [25] **Shiffman, Daniel.** *Learning Processing, 2nd Edition*. Burlington, MA : Morgan Kaufmann, 2015.
- [26] **Team, OpenCV Dev.** Histogram Equalization. [Online] [Cited: Oct 28, 2018.] https://docs.opencv.org/3.4/d4/d1b/tutorial_histogram_equalization.html.
- [27] **Ivan, Bachelder.** *Method and apparatus for focusing an optical inspection system*. 6,636,298 B1 United States of America, October 21, 2003. Utility.
- [28] **al., Bishop et.** *Automated optical inspection of unit specific patterning*. US 9,401,313 B2 USA, Julio 26, 2016. Utility.
- [29] *Shadow Removal for Aerial Imagery by Information Theoretic Intrinsic Image Analysis*. **Kwatra, V., Han, M., Dai, S.** Mountain View, CA : Google Inc., International Conference on Computational Photography, IEEE, 2012.

- [30] *Shadow Detection with Paired Regions and Reconstruction in Single Image*. **Hrituja D. Gujar, V.N.Dhage**. 4, Maharashtra, India : International Journal of Engineering Science and Computing, 2016, Vol. 6. ISSN 2321 3361.
- [31] *Automated visual inspection in the semiconductor industry: A survey*. **Szu-Hao, H., Ying-Cheng, P.** Taiwan : Department of Industrial Engineering and Engineering Management, National Tsing Hua University, 2014.
- [32] *A Hierarchical Approach to Robust Background Subtraction using Color and Gradient Information*. **O. Javed, K. Shafique, and M. Shah**. Orlando, Fl. : IEEE Workshop on Motion and Video Computing,, 2002.
- [33] **R. Fisher, S. Perkins, A. Walker and E. Wolfart**. Pixel Subtraction. *Image processing learning resources*. [Online] 2003. <https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/pixsub.htm>.
- [34] **Tazehkandi, Amin Ahmadi**. *Hands-On Algorithms for Computer Vision*. Birmingham - Mumbai : Packt Publishing, 2018.
- [35] **Gálvez del Postigo C, Torres J, Menéndez JM**. *Vacant parking area estimation through background subtraction and transience map analysis*. s.l. : IET Intell Transp Syst, 2015.
- [36] *Comparing costs and ROI of AOI and AXI*. **Edelstein, Peter**. 2, s.l. : Electronics Production and Test Europe, 2007, Vol. 1.
- [37] **Nikon, Inc**. Cámaras Réflex Digitales > D3400. [Online] 2017. [Cited: May 25, 2017.] <http://www.nikon.com.mx/nikon-products/product/dslr-cameras/d3400.html#tab-ProductDetail-ProductTabs-TechSpecs>.
- [38] **Lenovo**. ThinkPad T470 (14", Intel). [Online] 2018. [Cited: November 4, 2018.] https://www.lenovo.com/mx/es/laptops/thinkpad/serie-t/ThinkPad-T470/p/22TP2TT4700?gclid=EAlaIqObChMI1-TH1r273gIVAy5pCh3IMgIWEAAYASAAEgKf4vD_BwE&cid=mx:sem|se|google|361845812157|Thinkpad+T470|Lenovo_ThinkPad_T_series|136085423&ef_id=EAlaIqObChMI1-TH1r273g.
- [39] **team, OpenCV**. OpenCV. [Online] 2017. [Cited: May 25, 2017.] <http://opencv.org/>.
- [40] **Eclipse Foundation, Inc**. About the Eclipse Foundation. [Online] 2019. <https://www.eclipse.org/org/>.
- [41] **Ellis, Carl**. Image Background Removal. [Online] February 13, 2014. <https://making.lyst.com/2014/02/13/background-removal/>.
- [42] **Lin, Low Wei**. OpenCV Image Background Removal. [Online] August 01, 2014. https://github.com/LowWeiLin/OpenCV_ImageBackgroundRemoval.

- [43] **Team, OpenCV Dev.** Basic Thresholding Operations. [Online] [Cited: Mar 15, 2018.] <https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/imgproc/threshold/threshold.html?highlight=threshold>.
- [44] —. Miscellaneous Image Transformations. [Online] [Cited: Mar 25, 2018.] https://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/miscellaneous_transformations.html?highlight=floodfill.
- [45] —. Structural Analysis and Shape Descriptors. [Online] [Cited: Mar 25, 2017.] https://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/structural_analysis_and_shape_descriptors.html?highlight=findcontours.
- [46] **Mallick, Satya.** Image alignment feature based using OpenCV. [Online] Aug 25, 2018. <https://www.learnopencv.com/image-alignment-feature-based-using-opencv-c-python/>.
- [47] **Team, OpenCV Dev.** Operations on Arrays. [Online] [Cited: September 28, 2018.] https://docs.opencv.org/2.4/modules/core/doc/operations_on_arrays.html?highlight=avg#mean.
- [48] **Lin, Low Wei.** Remove image background and shadows. [Online] [Cited: May 27, 2018.] https://github.com/LowWeiLin/OpenCV_ImageBackgroundRemoval.
- [49] **Thiadmer Riemersma.** Colour metric. [Online] CompuPhase, Mar 03, 2018. <https://www.compuphase.com/cmetric.htm>.
- [50] **Company, The Qt.** Get Qt. [Online] 2018. [Cited: Jun 12, 2018.] <https://www.qt.io/download>.
- [51] **alternativeTo.** Alternatives to Qt for all platforms with any license. [Online] 2018. [Cited: Aug 15, 2018.] <https://alternativeto.net/software/qt/>.
- [52] **Christine Cavarro-Menard, Amine Naït-Ali.** Quality Assessment of Lossy Compressed Medical Images. *Compression of Biomedical Images and Signals*. Wiltshire, UK : John Wiley & Sons, 2008.
- [53] **Loong, T-W.** Understanding sensitivity and specificity with the right side of the brain. *PubMed Central*. [Online] Sep 27, 2003. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC200804/>.
- [54] **LaMorte, Wayne W.** Positive and Negative Predictive Value. *Boston University School of Public Health*. [Online] Jun 15, 2016. http://sphweb.bumc.bu.edu/otlt/MPH-Modules/EP/EP713_Screening/EP713_Screening5.html.
- [55] **PCBCART.** Automated Optical Inspection. [Online] 2019. <https://www.pcbcart.com/assembly-capability/aoi.html>.