



Inspección óptica sobre uniones de soldadura, un estudio de la aplicación de la física de la reflexión de un modelo RGB

Serna-Hernández, R.; Salas-García, J.*; Vilchis González, A.H.

Información del Artículo	Resumen
Recibido: 19-nov-2024 Aceptado: 20-dic-2024	Para mostrar la viabilidad técnica de la inspección óptica automática, se presenta la a física de operación que sustenta su viabilidad práctica como modelo para determinar la calidad de las uniones de soldadura de componentes electrónicos. Se ilustra como la modificación de los niveles de iluminación sobre superficies especulares crean las condiciones propicias para la generación de patrones de reflexión sobre elementos de interés como lo es una unión de soldadura. Se muestra la teoría y los principios de funcionamiento de la iluminación, incidencia y reflexión de ondas y su relación práctica e implementación viable en un sistema de inspección óptica.
Palabras clave: uniones de soldadura, inspección, óptica reflectiva	

1. Introducción

La utilización de circuitos electrónicos se ha convertido en una parte importante del día a día de las actividades del ser humano al estar presentes en los dispositivos necesarios para desarrollar las mismas. Por su practicidad, los circuitos electrónicos en su mayoría hacen uso mayoritariamente de dispositivos con tecnología SMT (*Surface Mount Technology*), la cual es el método más común utilizado para conectar de manera permanente dispositivos SMD (*Surface Mount Devices*) hacia una PCB (*Printed Circuit Board*) [1]; que intrínsecamente lleva a tener con niveles de miniaturización y calidad elevados, elevando la complejidad de estos circuitos electrónicos.

De este hecho, surge otra necesidad para la fase de inspección y aseguramiento de la calidad de dichos circuitos, la cual debe estar a la par del nivel de complejidad de la fabricación. Por lo que realizar el control de calidad de las uniones de soldadura de una placa de circuito impreso PCB mediante una inspección visual, ha quedado totalmente rebasada e inviable para los requerimientos de la industria actual, donde se busca un método de prueba no destructivo NDT (*Non-Destructive Testing*) para detectar defectos de la soldadura aplicada en la patilla de un componente SMT, que dada su heterogeneidad y la naturaleza o razones por los cuales se producen como lo son discontinuidades, impurezas y morfología (como la concavidad o convexidad) presentan un reto poco viable para la inspección manual [2]; porque el proceso de soldadura de componentes electrónicos se lleva a cabo en masa y cualquier defecto asociado afecta directamente a la funcionalidad del producto final [3].

Este hecho lleva necesariamente a requiere un método automático de realizar esta tarea repetitiva y donde los sistemas de inspección óptica automatizada AOI (*Automated Optical Inspection*) surgen como una opción utilizando como física de operación el comportamiento de la luz visible y los fenómenos reflectivos producidos por la interacción con el medio

por el que se propaga. El presente trabajo busca ilustrar como a través del comportamiento geométrico de un haz de luz y de los fenómenos de la reflexión asociados, es posible extraer información de interés que permita generar patrones de reflexión mediante los cuales se pueda determinar la calidad de una unión de soldadura en un componente electrónico tipo SMT.

2. Fundamentos de la Física de la Luz

Tomando como referencia a la luz visible como la onda electromagnética de interés como alternativa de aplicación práctica y principio de operación de un posible sistema de inspección, se define a los colores espectrales como los colores presentes en la luz visible, también conocidos como colores monocromáticos. Estos colores tienen longitudes de onda asociadas (medidas en el vacío). La Tabla 1 muestra los intervalos de longitud de onda emitidos por los colores del espectro visible y el intervalo de frecuencias asociadas a los mismos [4].

Tabla 1: Intervalos de longitud de onda y frecuencia para colores espectrales. Unidades en nanómetros y Tera Hertz (Modificado de Carrillo [3]).

Color	Intervalo de longitud de onda λ	Intervalo de frecuencia
Rojo	$\sim 625 - 740 \text{ nm}$	$\sim 480 - 405 \text{ THz}$
Naranja	$\sim 590 - 625 \text{ nm}$	$\sim 510 - 480 \text{ THz}$
Amarillo	$\sim 565 - 590 \text{ nm}$	$\sim 530 - 510 \text{ THz}$
Verde	$\sim 500 - 565 \text{ nm}$	$\sim 600 - 530 \text{ THz}$
Cyan	$\sim 485 - 500 \text{ nm}$	$\sim 620 - 600 \text{ THz}$
Azul	$\sim 440 - 485 \text{ nm}$	$\sim 680 - 620 \text{ THz}$
Violeta	$\sim 380 - 440 \text{ nm}$	$\sim 790 - 680 \text{ THz}$

El cálculo de los intervalos de longitud de onda y su frecuencia asociada parte del análisis del movimiento de una onda; Serway et al. [5] define el periodo de éste como el intervalo de tiempo en que una onda pase a través de un ciclo completo de su movimiento; gráficamente los valores de x , y , v para la partícula/onda en el tiempo t iguala los valores de x , y , v en el tiempo $t + T$. En radianes, se entiende que la fase aumenta en 2π radianes en un intervalo de tiempo T , en el cual interviene la frecuencia angular, identificada con la constante ω , la cual es la medida en $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ de qué tan rápido se presenta una oscilación, La ecuación que describe la frecuencia angular es:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

En un haz de luz visible, las variaciones de la misma siguen un comportamiento sinusoidal, por lo cual matemáticamente puede ser expresada a través de la función de onda

$$y(x, t) = A \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \right]$$

Siendo A es la amplitud de la onda, λ la longitud de onda y v es la velocidad. La Figura 1 muestra la representación gráfica de una onda senoidal desplazándose en sentido positivo.

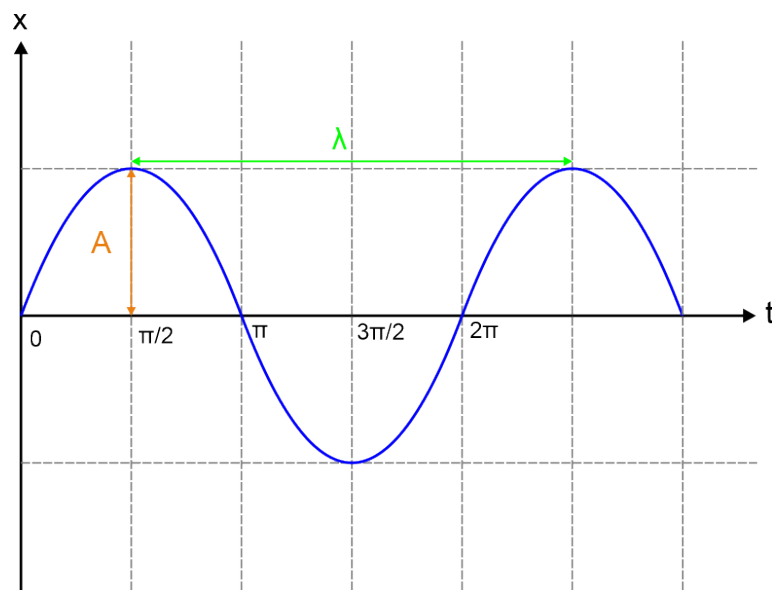


Figura 1: Representación gráfica de una onda

La frecuencia angular ω de una onda se puede expresar a través de su periodo T y su frecuencia f

$$\omega \equiv \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (2)$$

Matemáticamente, los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética sinusoidal se describen de la forma

$$E = E_{\text{máx}} \cos(\kappa x - \omega t) \quad (3)$$

$$B = B_{\text{máx}} \cos(\kappa x - \omega t) \quad (4)$$

Serway et al [4] indica que dichas ecuaciones representan soluciones especiales a las ecuaciones de onda plana para E y B , y con base en esto, la longitud y frecuencia de las ondas electromagnéticas se relacionan mediante:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3,00 \times 10^8 \frac{m}{s}}{f} \quad (5)$$

3. Principios de Reflexión y Óptica Geométrica

Tippens [6] define el tratamiento de ondas electromagnéticas en forma de rayos como óptica geométrica y según el principio de Huygens estos rayos son perpendiculares a los frentes de onda que avanzan en el mismo sentido de propagación del haz. Los cambios de dirección que experimenta un rayo de luz se rigen por las leyes de reflexión. Se conocen dos tipos de reflexiones; La reflexión especular, también conocida como regular, es aquella que procede de una superficie reflectora pulida o lisa donde los rayos reflejados son paralelos entre sí. Si las variaciones de la superficie reflectores son mucho menores que la longitud de onda de la onda incidente, dicha superficie lisa se puede considerar como especular. Para la aplicación práctica del presente artículo, la reflexión difusa no es de interés particular, sin embargo; se entiende como el fenómeno que ocurre en una superficie rugosa, donde los rayos de luz son reflejados en distintas direcciones [5, 6].

Matemáticamente la ley de la reflexión se describe a través de la correspondencia, que indica que el ángulo de incidencia θ_i es igual al ángulo de reflexión θ_r respecto a la normal N .

$$\theta_r = \theta_i \quad (6)$$

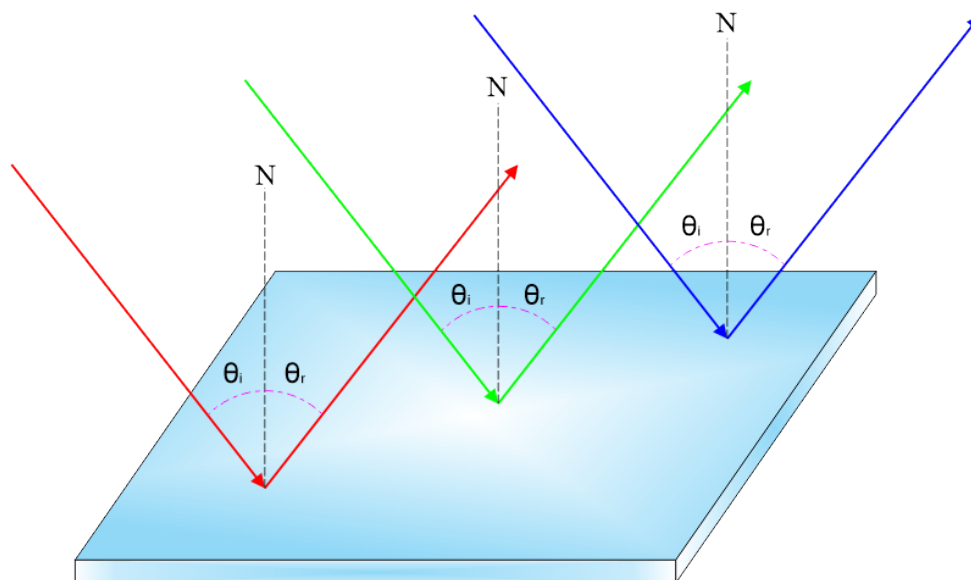


Figura 2: Representación gráfica de la ley de reflexión.

4. Aplicación en Superficies Especulares

Conectando la necesidad de contar con un sistema de inspección óptica para una placa de circuito impreso con el comportamiento de una superficie reflectora remite a Hao et al [7] cuyo trabajo trata sobre las superficies especulares y su relación con las patillas de un componente SMT y las uniones de soldadura, las cuales se comportan como un espejo plano, lo cual evidentemente se relaciona con la correspondencia que describe la ley de reflexión.

La caracterización específica de las superficies especulares en uniones de soldadura presenta particularidades notables que merecen un análisis detallado. La aleación de estaño-plomo (Sn-Pb) tradicionalmente utilizada, o las alternativas libres de plomo como SAC305 (Sn-Ag-Cu), exhiben propiedades reflectivas que varían según su composición y proceso de solidificación. La microestructura resultante del proceso de enfriamiento afecta directamente las propiedades ópticas de la superficie, donde los diferentes compuestos intermetálicos (Cu_6Sn_5 y Ag_3Sn) pueden generar variaciones locales en la reflectividad.

El comportamiento especular de estas superficies se ve significativamente influenciado por el proceso de reflujo térmico. La temperatura pico alcanzada durante el proceso y la velocidad de enfriamiento determinan el tamaño y distribución de los granos cristalinos en la superficie de la soldadura. Este fenómeno resulta particularmente relevante ya que la textura superficial resultante afecta directamente la calidad de la reflexión especular. Matemáticamente, esto puede expresarse mediante el coeficiente de reflexión especular (R_s):

$$R_s = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción del aire y la superficie de soldadura respectivamente.

La rugosidad superficial (σ) de la soldadura juega un papel crucial en la calidad de la reflexión especular. Para que una superficie se comporte como un reflector especular efectivo, debe cumplirse la condición de Rayleigh:

$$\sigma < \frac{\lambda}{8 \cos \theta_i}$$

donde λ es la longitud de onda de la luz incidente y θ_i es el ángulo de incidencia. Esta relación explica por qué diferentes longitudes de onda del espectro RGB pueden revelar distintos aspectos de la calidad superficial de la soldadura.

En el contexto de la inspección automatizada, la naturaleza especular de las uniones de soldadura permite implementar técnicas de análisis multidireccional. Al variar sistemáticamente el ángulo de iluminación (θ_i), es posible construir un mapa completo de la topografía superficial. La ecuación que relaciona la intensidad de luz reflejada (I_r) con el ángulo de incidencia y las propiedades del material viene dada por:

$$I_r = I_0 R_s(\theta_i) \exp\left(-\frac{4\pi\sigma \cos \theta_i}{\lambda}\right)$$

donde I_0 es la intensidad de luz incidente y $R_s(\theta_i)$ es el coeficiente de reflexión especular en función del ángulo de incidencia.

La caracterización de defectos superficiales se beneficia particularmente de este comportamiento especular. Las discontinuidades típicas como vacíos, grietas o exceso de soldadura modifican localmente el patrón de reflexión. Para una superficie ideal, la distribución angular de la luz reflejada ($D(\theta)$) sigue una distribución gaussiana centrada en el ángulo de reflexión esperado:

$$D(\theta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_r)^2}{2\sigma^2}\right)$$

donde σ representa la desviación estándar de la distribución angular, que está directamente relacionada con la calidad superficial de la soldadura.

Este comportamiento especular predecible permite desarrollar algoritmos de procesamiento de imagen que pueden identificar y clasificar defectos basándose en las desviaciones del patrón de reflexión ideal. La combinación de múltiples ángulos de iluminación y la captura sincronizada de imágenes facilita la reconstrucción tridimensional de la superficie de soldadura, proporcionando información crucial sobre su geometría y calidad.

5. Modelo de Color RGB y Patrones de Reflexión

Partiendo del concepto de colores espectrales, dentro del procesamiento digital de imágenes, las longitudes de onda usadas como base son los colores primarios: rojo, verde y azul, mediante los cuales se pueden generar modelos que permitan analizar la información individual de cada haz de luz que lo compone.

Cuevas et al. [8] considera los modelos RGB como un formato de color aditivo, lo que significa que la combinación de los colores se basa en la adición de los componentes individuales considerando como base el negro. Este proceso puede ser visto como el traslape de tres rayos de luz de colores rojo, verde y azul, los cuales son dirigidos hacia una superficie blanca, y cuya intensidad puede ser continuamente controlada; y donde la intensidad de los componentes de color determina tanto el tono como la iluminación de color resultante. Este principio es de vital interés para la generación de patrones de iluminación y reflexión, de los cuales es posible extraer información relevante según el comportamiento de una específica longitud de onda, en este caso, de las tres que componen el modelo RGB.

La Figura 3 muestra el modelo 2D de un patrón de reflexión sobre las uniones de soldadura de un componente SMT utilizando un modelo RGB para la fuente de iluminación.

Hasta ahora se ha explorado como la óptica geométrica se comporta en una unión de soldadura partiendo de un modelo de color específico de los colores espectrales; el paso

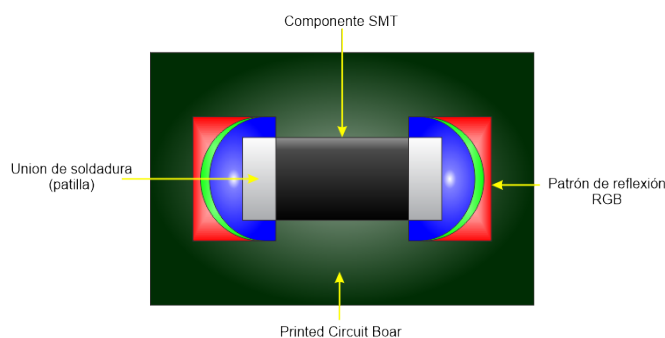


Figura 3: *Patrón de reflexión RGB sobre la unión de soldadura de un componente SMT*

natural a seguir dentro la búsqueda de la implementación práctica de estos principios físicos es el cómo es posible capturar la información producto de la reflexión de los haces de luz bajo análisis para su posterior procesamiento.

6. Implementación Práctica y Sensores

El sensor de una cámara digital es el elemento que determina la cantidad de luz que el dispositivo va a utilizar para crear una imagen. Los sensores están compuestos de receptores de luz conocidos como fotositos (en inglés, *photosite*) los cuales hacen la función de un transductor al convertir energía óptica en energía eléctrica. Esta señal eléctrica es proporcional a la intensidad de la luz captada por el fotosito.

La relación de los modelos de color RGB con el funcionamiento de los fotositos se da debido a que estos últimos contienen filtros de color basados en el modelo aditivo y la transducción de la energía óptica a eléctrica se relaciona directamente con la intensidad de la luz detectada por el sensor de cada una de estas longitudes de onda.

La Figura 4, ilustra gráficamente la implementación práctica de la ley de reflexión en la soldadura de un dispositivo electrónico SMT. Los rayos de luz incidentes en la patilla del componente (considerada como una superficie especular,) tendrán ángulos de reflexión seguirán la correspondencia previamente descrita, siendo iguales al ángulo de incidencia; los cuales serán reflejados hacia el sensor de una cámara digital (y por ende de los fotositos que éste contiene), representa un elemento idóneo para la detección de los haces de luz RGB para su posterior procesamiento.

La habilidad de una cámara para la generación de una imagen está determinada por el tipo y el tamaño del sensor con el que cuenta. La Tabla 2 muestra los diversos tipos de sensores disponibles a nivel comercial junto con los tamaños y áreas asociados a los mismos.

R. Serna [9] presentó un sistema de control óptico automático cuyo principio de operación es la capacidad de obtener información a través del ángulo de reflexión de los colores

Tabla 2: Tipos de sensores de cámaras y tamaños asociados disponibles comercialmente.

Tipo/Nombre	Tamaño del sensor	Área del Sensor
Formato Medio	$53.7 \times 40.2 \text{ mm}$	21.59 cm^2
Full Frame	$36 \times 23.9 \text{ mm}$	8.6 cm^2
APS-H	$27.9 \times 18.6 \text{ mm}$	5.19 cm^2
APS-C	$23.6 \times 15.8 \text{ mm}$	3.73 cm^2
4/3	$17.3 \times 13 \text{ mm}$	2.25 cm^2
1"	$13.2 \times 8.8 \text{ mm}$	1.16 cm^2
1/1.63"	$8.38 \times 5.59 \text{ mm}$	0.47 cm^2
1/2.3"	$6.16 \times 4.62 \text{ mm}$	0.28 cm^2
1/3.2"	$4.54 \times 3.42 \text{ mm}$	0.15 cm^2

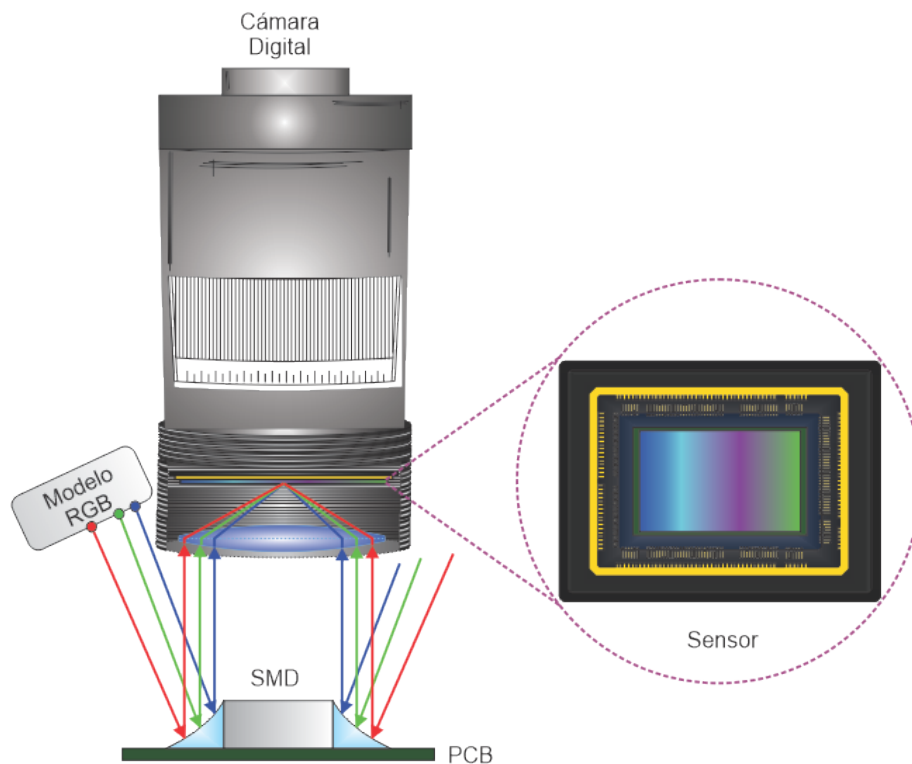


Figura 4: Reflexión de haces de luz RGB desde la patilla/soldadura de un componente SMT hacia el sensor de una cámara digital.

espectrales en uniones de soldadura de *PCB*. Particularmente, usando un modelo de color *RGB* (*Red Green Blue*), el cual, mediante el procesamiento de imágenes y el posterior análisis de patrones de iluminación, reflexión y detección de bordes, permite a este desarrollo determinar la calidad de las uniones de soldadura de los componentes con la tecnología *SMT*.

7. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un análisis detallado de los fundamentos físicos que sustentan la viabilidad de sistemas de inspección óptica automática para la evaluación de uniones de soldadura en componentes electrónicos. Las principales conclusiones que se derivan de este estudio son:

La aplicación de los principios de la óptica geométrica, particularmente la ley de reflexión en superficies especulares, proporciona una base teórica sólida para el desarrollo de sistemas *AOI* (*Automated Optical Inspection*). Se ha demostrado que la correspondencia entre los ángulos de incidencia y reflexión ($\theta_i = \theta_r$) en las superficies de soldadura permite generar patrones de reflexión predecibles y analizables.

El uso del modelo de color *RGB* como base para la iluminación presenta ventajas significativas para la inspección de soldaduras. La capacidad de controlar independientemente las intensidades de los tres colores primarios (rojo, verde y azul) permite generar patrones de reflexión específicos que maximizan la detección de defectos en las uniones de soldadura. Esta característica es particularmente relevante dado que las longitudes de onda específicas de cada color pueden interactuar de manera diferente con las imperfecciones de la superficie.

La implementación práctica de estos principios físicos se ve favorecida por la tecnología actual de sensores en cámaras digitales. Los fotositos, al actuar como transductores de energía óptica a eléctrica y contar con filtros *RGB* integrados, proporcionan una plataforma ideal para la captura y análisis de los patrones de reflexión generados. Esta capacidad tecnológica permite una detección precisa de las variaciones en la reflexión que pueden indicar defectos en la soldadura.

El sistema propuesto representa una solución viable para los desafíos actuales en la industria electrónica, donde la inspección manual ha quedado obsoleta debido a la creciente miniaturización y complejidad de los componentes *SMT*. La capacidad de realizar inspecciones no destructivas (*NDT*) de manera automatizada responde directamente a las necesidades de control de calidad en la producción masiva de circuitos electrónicos.

La fundamentación matemática presentada, desde las ecuaciones de onda electromagnética hasta los principios de reflexión, proporciona un marco teórico robusto que permite predecir y modelar el comportamiento de la luz en las superficies de soldadura. Este entendimiento profundo facilita la optimización de los sistemas de inspección y la interpretación de los resultados obtenidos.

El trabajo establece las bases para futuras investigaciones en el campo de la inspección óptica automatizada, particularmente en el desarrollo de algoritmos de procesamiento de imágenes que aprovechen la información contenida en los patrones de reflexión RGB para la identificación automática de defectos en las uniones de soldadura.

Estas conclusiones demuestran que la aplicación de principios físicos fundamentales, combinada con tecnologías modernas de captura y procesamiento de imágenes, ofrece una solución práctica y efectiva para los retos actuales en la inspección de calidad de componentes electrónicos. El enfoque presentado no solo es teóricamente sólido, sino que también es técnicamente viable y alineado con las necesidades de la industria moderna.

Direcciones de correo de los autores

SERNA-HERNÁNDEZ, R.: raulserna10@outlook.com

SALAS-GARCÍA, J.*: jsalasg@uaemex.mx

VILCHIS GONZÁLEZ, A.H.: avilchisg@uaemex.mx

Referencias

- [1] Tsai, T. (2012). *Thermal parameters optimization of a reflow soldering profile in printed circuit board assembly: A comparative study*. Applied Soft Computing, 12, 2601-2613.
- [2] Zapata, J., Vilar, R., & Ruiz, R. (2010). *An adaptive-network-based fuzzy inference system for classification of welding defects*. NDT&E International, 43, 191-199.
- [3] Carillo, D. (2007). *Procesamiento de Señales*. INAOE.
- [4] Liukkonen, M., Havia, E., & Hiltunen, Y. (2012). *Computational intelligence in mass soldering of electronics – A survey*. Expert Systems with Applications, 39, 9928-9937.
- [5] Serway, R., & Jewett, J.W. (2009). *Física para ciencias e ingeniería*. Volumen 1, 2. Cengage Learning. pp. 421, 959, 969, 982.
- [6] Tippens, P. (2001). *Física, Conceptos y aplicaciones*. 7a ed. McGraw-Hill. pp. 662, 663, 664.
- [7] Hao, W., Xianmin, Z., Yongcong, K., Gaofer, O., & Hongwei, X. (2010). *Solder joint inspection based on neural network combined with genetic algorithm*. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 124, 4110-4116.
- [8] Cuevas, E., Zaldivar, D., & Pérez, M. *Procesamiento digital de imágenes usando MatLAB y Simulink*. México: Alfaomega.
- [9] Serna, R. (2020). *Sistema de control por procesamiento de imágenes de una máquina CNC para soldar circuitos integrados*.