

El ensayo no destructivo usando termografía infrarroja en el mundo y en América Latina: Una Revisión

Infrared thermal nondestructive testing in the world and Latin America: A Review

J. H. Erazo-Aux  ; H. Loaiza-Correa  ; A. D. Restrepo-Girón 
DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.24717>

Artículo de revisión

Abstract—This paper presents a review concerning nondestructive testing by infrared thermography. The study includes articles by well-known researchers from around the world and Latin America. From a literature review, there is currently a growing trend in scientific production in this field. The above confirms its importance and the demand for constant development. The works found were organized into four scope lines: a. state of the art, b. thermal information processing techniques, c. performance metrics, and d. simulation, thermal models, and applications. In addition, the paper presents the traditional and emerging countries supporting the new developments in the nondestructive testing area. Finally, there is a trend towards processing thermal image sequences rather than single images where are reported few developments. The number of methods is increasing, and there is a reduced number of metrics for the quantitative performance evaluation.

Index Terms—composite materials, infrared thermography, nondestructive testing, review.

Resumen—En este artículo se sintetiza una revisión de los principales trabajos relacionados con ensayo no destructivo usando termografía infrarroja incluyendo aportes realizados por investigadores de América Latina. Se encontró en este campo una tendencia creciente de la producción académica en los últimos años, lo cual ratifica que es un área de interés y desarrollo continuo. El resultado de la revisión se clasificó en cuatro líneas temáticas cubriendo principalmente: i) trabajos que recopilan el estado del arte, ii) desarrollos en técnicas de procesamiento de información térmica, iii) indicadores de desempeño y iv) simulación, modelos térmicos y campos de aplicación. Adicionalmente, se registraron los países tradicionales y emergentes que están generando contribuciones en el sector del ensayo no destructivo usando termografía infrarroja. Finalmente, se identificó cómo el enfoque actual del procesamiento de información térmica está orientado al procesamiento de secuencias de imágenes, donde el número de técnicas es cada vez

mayor y se evidenció una reducida cantidad de métricas para la evaluación objetiva de su rendimiento.

Palabras claves— ensayo no destructivo, materiales compuestos, revisión de literatura, termografía infrarroja.

I. INTRODUCCIÓN

LA Termografía Infrarroja (IRT, del inglés: infrared thermography) es una técnica de ensayo no destructivo que, a partir de su capacidad para capturar radiación infrarroja de una escena, es utilizada como método de inspección para examinar una pieza, material o sistema sin afectar o alterar sus características, así como para evaluar su funcionamiento presente y futuro. A pesar de existir una amplia variedad de técnicas asociadas con Ensayos No Destructivos (NDT, del inglés: nondestructive testing) que comparten algunas ventajas, la técnica de ensayo no destructivo por termografía infrarroja (TNDT, del inglés: infrared thermography nondestructive testing) se caracteriza además por ser rápida, segura, no invasiva y libre de contacto [1]. Características que la hacen aún más atractiva en un amplio rango de aplicaciones especialmente en la industria aeroespacial, naval, automotriz y hace algunos años en salud estructural entre otras [2], [3].

Este artículo tiene como objetivo presentar una revisión de literatura relacionada con ensayos no destructivos usando termografía. Para el desarrollo de la revisión se definió el tema central para la búsqueda, las estrategias de búsqueda, los criterios de selección de la información y finalmente, se asocia y presenta una síntesis de la información recopilada.

Este documento se encuentra organizado en cuatro secciones. La primera hace un recorrido sobre los principales trabajos

Este manuscrito fue enviado el 29 de junio de 2021 y aceptado el 30 de marzo de 2022.

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (Minciencias); Convocatoria 727 de 2015. Además, por la Institución Universitaria Antonio José Camacho (UNIAJC). Proyectos de Investigación PD0916 y PD0121.

J. H. Erazo-Aux. Profesor Asociado adscrito a la facultad de ingeniería de la Institución Universitaria Antonio José Camacho, Cali, VA 760046 Colombia (e-mail: jherazo@admon.uniajc.edu.co).

H. Loaiza-Correa. Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, Cali, VA 760032 Colombia (e-mail: humberto.loaiza@correounivalle.edu.co).

A. D. Restrepo-Girón. Profesor Asociado de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, Cali, VA 760032 Colombia (e-mail: andres.david.restrepo@correounivalle.edu.co)



desarrollados que recopilan el estado del arte en el área. La siguiente sección reúne información sobre los adelantos en diferentes tópicos relacionados al TNDT incluyendo los aportes más importantes hechos desde Latinoamérica. La sección de resultados y análisis presenta información que permite identificar los investigadores y ejecutores en el desarrollo del TNDT; y por último una sección de conclusiones que muestra cómo el enfoque actual para procesamiento de información térmica se orienta al procesamiento de secuencias de imágenes, donde el número de técnicas está en crecimiento y se evidencia la necesidad de contar con métricas robustas para evaluar su desempeño.

II. CONCEPTOS Y EVOLUCIÓN DEL TNDT

Las primeras patentes relacionadas con la identificación de puntos u objetos calientes se documentan como evidencia de los inicios del TNDT, al surgir de necesidades específicas a nivel industrial, las cuales involucraban el análisis de propiedades térmicas de materiales (principalmente metales). A mediados de los sesenta, se reporta la implementación de uno de los primeros ejercicios de TNDT, que fue realizado a la carcasa del motor de un proyectil y donde se identificaron problemas relacionados con las propiedades de emisividad de los objetos pertenecientes al sistema inspeccionado. Debido a la carrera espacial, el método se vuelve atractivo para investigadores relacionados con esa industria, y de forma paralela la Sociedad Americana de Pruebas No Destructivas (ASNT, del inglés: american society for nondestructive testing) establece el primer comité que daría origen a publicaciones periódicas en el área. En su teoría, la evaluación térmica involucra la solución directa e inversa de problemas de transferencia de calor, donde variaciones de las propiedades térmicas y la presencia de defectos internos en el material inspeccionado generan disturbios dinámicos sobre el patrón térmico del material de interés [4]. Hasta ese entonces el enfoque cualitativo del método limitaba su éxito frente a otras técnicas de inspección. La inclusión de elementos de teoría de conducción de calor proporcionó un nuevo nivel al TNDT, lo cual fue explotado y desarrollado por autores como Balageas [5], Vavilov & Taylor [6], MacLuaghlin & Mirchandani [7], Popov & Karpelson [8] entre otros y quienes además en la década de los 80 introdujeron modelos de defectos 1D, 2D y 3D [9]; por último, desde la década de los 90 aparecen los aportes de Maldague [10]–[12]. El TNDT incluye generalmente la estimulación térmica de la muestra a inspeccionar registrando su respuesta térmica en función del tiempo (enfoque activo). Este procedimiento incrementa su complejidad al considerar más variables, aunque en primera instancia parezca sencillo. La obtención de temperaturas absolutas con una cámara Infrarroja (IR, del inglés: infrared) necesita relacionar variables como la temperatura del objeto de interés, su distancia con respecto a la cámara, la humedad del ambiente, la temperatura del medio ambiente y de la atmósfera, la emisividad del objeto, el índice de transmisión de la atmósfera, así como la cantidad de partículas de polvo presentes en el ambiente [13], [14]. Reuniendo los conceptos anteriores y complementándolos con teorías fundamentales de transferencia de calor, tomó fuerza en

la década de los 90 el concepto de Termografía Infrarroja Cuantitativa (QIRT, del inglés: quantitative infrared thermography). Desde un enfoque experimental [15], se utiliza comúnmente una cámara IR que genera imágenes en el dominio espacial y temporal a partir de las cuales es posible aproximar la profundidad o grosor de los defectos [4]. En la mayoría de las aplicaciones para TNDT no es necesario una medición absoluta de temperatura, la cual generalmente se encuentra en ejercicios de inspección con termografía pasiva. Por el contrario, sólo se requiere realizar mediciones relativas usando el enfoque activo de la técnica [16]. En el marco de este procedimiento se resalta la importancia de conceptos como la sensibilidad, la precisión, la resolución espacial y la frecuencia de adquisición. Estos términos se definen a continuación:

- Sensibilidad Térmica (NETD, del inglés: noise equivalent temperature difference): ruido equivalente a la menor temperatura detectable. Cuanto más bajo es el NETD mejor se podrá detectar un contraste térmico significativo observable - sobreponiéndose al ruido del sistema.
- Precisión: es la medida de la confiabilidad en la estimación de temperatura aparente en relación con la temperatura verdadera. Normalmente depende de la tecnología del dispositivo de captura: en cámaras bolométricas de tipo Arreglo de Plano Focal (FPA, del inglés: focal plane array) se encuentra entre 50–100 mK y en detectores cuánticos refrigerados aprox. 20 mK. Casi todas las cámaras tienen una precisión de $\pm 2^\circ\text{C}$ ó $\pm 2\%$ para rangos más amplios.
- Resolución espacial: campo de visión instantáneo que representa el área cubierta por un sensor remoto en un determinado momento. Se presenta en términos del Campo de Visión Instantáneo (IFOV, del inglés: instantaneous field of view) con unidades de miliradianes y depende del tamaño del detector y de la óptica del dispositivo de captura.
- Frecuencia de la imagen: velocidad a la cual el instrumento de captura puede adquirir imágenes. Puede ser de cientos de Hz, para tecnologías basadas en detectores refrigerados y generalmente con la posibilidad de incrementarse si la cámara ofrece la posibilidad de reducir el tamaño de las imágenes.

El material por inspeccionar se puede someter a diferentes procesos de estimulación de energía que son descritos generalmente por funciones matemáticas en el dominio temporal (impulso, pulso rectangular, sinusoides). Los generadores de estímulos térmicos de naturaleza óptica o fototérmica (flash, lámparas halógenas o Xenón, láser, etc.) son los más utilizados. Las propiedades del material inspeccionado afectan en gran medida la cantidad de energía que puede absorber, por lo que se convierten en la principal condición que limita la aplicación de cada alternativa de excitación [6, 45]. Las técnicas de TNDT se clasifican en función de cómo se obtienen las imágenes y cómo se procesan. Las cuatro principales técnicas son: termografía pulsada, termografía modulada, vibrotermografía, encontrándose además la termografía de fase pulsada que nace de la combinación de la

termografía pulsada y la termografía modulada [2], [3]. Pocas veces los defectos en el material inspeccionado son fácilmente detectables en las imágenes producto de los métodos anteriormente citados, por lo que es indispensable aplicar técnicas de procesamiento de imágenes para complementar el estudio de ellas [2]. Tanto las técnicas de procesamiento de información térmica clásicas y recientes se enfocan en reducir el ruido antes y después de las etapas de análisis, buscando mejorar el contraste de las imágenes y entregar datos valiosos que faciliten la detección y/o caracterización de defectos. La sumatoria espacial de píxeles y sumatoria temporal de imágenes se ha utilizado para el procesamiento de imágenes IR [16], así como métodos para corrección de píxeles anómalos, efecto vignetting y atenuación de ruido [17]. Muchos procedimientos y técnicas se han desarrollado y documentado en los últimos años [18], entre las que se destacan: la normalización del contraste, el contraste absoluto diferencial, la reconstrucción de señales termográficas, termografía de componentes principales, termografía de mínimos cuadrados parciales [2].

Muchas de las técnicas actuales de TNDT surgen de combinar métodos clásicos con información de propiedades físicas de los materiales, técnicas de procesamiento de imágenes y reconocimiento de patrones. En algunos casos se aplican las técnicas de forma independiente y luego se fusiona su información para el análisis posterior; en otros casos las técnicas son integradas y ejecutadas de forma simultánea. Como ejemplos de este tipo de fusión se reporta la combinación de la IRT con la tecnología de Radar de Penetración Terrestre (GPR, del inglés: ground penetrating radar), los rayos X, la interferometría láser, las imágenes digitales acústicas, el ultrasonido y las imágenes 3D entre otras [2]. Umar [19] en su trabajo realiza una descripción sobre la potencialidad de la técnica de Termografía Infrarroja Ultrasónica (UIT, del inglés: ultrasonic infrared thermography), la cual se ha utilizado durante la última década, principalmente por investigadores del área de termo-mecánica.

En [20], [21] se realiza una descripción sobre los principales avances en hardware y software desde el año 1990 alcanzados por La Universidad Politécnica de Tomsk donde la principal tarea se ha concentrado en modelado avanzado y procesamiento de información. De su trabajo se destacan productos como Multilayer, ThermoCalc: 2D-2DM-2D Build-6L-36L Source - Mine (para simulación de problemas TNDT) y ThermoFit Pro (para procesamiento de secuencia de imágenes IR sintéticas y experimentales), paquetes que son continuamente actualizados. También presentan adelantos en la determinación de propiedades térmicas de materiales anisótropos, evaluación de corrosión de superficies traseras, termografía infrarroja ultrasónica y por inducción, y análisis de fractura en materiales entre otros. Por último, a nivel de hardware se presentan adelantos en el desarrollo de unidades portátiles de TNDT para inspección de corrosión en cilindros metálicos y para inspección de aeronaves, con la finalidad de aplicar TNDT dentro y fuera de las condiciones habituales de un laboratorio, principalmente en los materiales compuestos (CFRP y Plásticos Reforzados con Fibra de Vidrio (GFRP, del inglés: glass fiber reinforced plastic)) y estructuras en forma de panel. Como

perspectivas en el campo del modelado se encuentra como meta el desarrollo de un paquete amigable y flexible con el usuario que permita resolver problemas típicos 3D en TNDT involucrando intercambio de calor no adiabático (lineal y no lineal), calentamiento arbitrario, transformación de fase en sustancias, entre otros. En cuanto al procesamiento de información los esfuerzos se concentran en el desarrollo de algoritmos inversos más precisos y robustos mejorando la capacidad para caracterización de defectos en forma, grosor y profundidad.

La siguiente producción académica [2], [22]–[24] recopila una cantidad considerable de fuentes de información sobre TNDT. Destacando de forma general aspectos como: terminología y modelos físicos, formulación matemática y soluciones analíticas, características básicas de TNDT, problemas inversos para caracterización de defectos con TNDT, algoritmos para procesamiento de información y eficiencia, hardware para TNDT y aplicaciones generales y específicas. Lo anterior permite proyectar que los adelantos a

TABLE I
NÚMERO DE PUBLICACIONES POR FUENTE DE INFORMACIÓN

Año	FUENTE DE INFORMACIÓN		
	Scopus	Web of Science	JEA-2021
2021	71	1	2
2020	307	7	9
2019	339	12	2
2018	292	9	3
2017	221	5	4
2016	216	6	17
2015	171	6	11
2014	148	7	18
2013	146	5	7
2012	98	6	9
2011	90	4	2
2010	63	4	3

un mediano plazo se encontrarán enfocados en las áreas de adquisición, estimulación, procesamiento y rangos de aplicaciones con nuevos materiales, que impondrán nuevos desafíos en el área.

III. LITERATURA Y TENDENCIAS ACTUALES

En el ámbito mundial existen algunas organizaciones que integran a la comunidad en el área de TNDT. Su origen se remonta a 1978 cuando en Estados Unidos nace el Thermosense respaldado por la Sociedad Internacional de Óptica y Fotónica (SPIE, del inglés: international society for optics and photonics) y el ITC-InfraMation, evento que convocó a profesionales de diferentes campos y permitió conocer e intercambiar información valiosa en el área, que inicialmente se encontraba dispersa entre diferentes conferencias y publicaciones sin conexión directa. La existencia de una conferencia transversal en Norte América ayudó a subsanar estos vacíos, ejercicio que en 1992 se replicó en Europa, dando origen a la conferencia QIRT, la que posteriormente en 2014 también fue institucionalizada en Asia, facilitando así la contribución de expertos de estos continentes. Al año 2016 es notable el alto

grado de participación de diferentes países encontrando un incremento cercano al 130 % en los últimos 22 años (Europa 51,4 %, Continente Americano 10,8 %, Asia 24,3 % y otras regiones 13,5 %) [25]. Lo anterior brinda un panorama de referencia sobre la contribución por regiones al TNDT, lo que, complementado a un ejercicio de búsqueda sobre algunas de las principales fuentes de información reconocidas, permite recopilar las cifras consignadas en la Tabla 1¹ confirmando una tendencia creciente de producción académica en el área (figura 1 columna 2: *procesamiento de secuencias de imágenes*). Con base en lo anterior, la información publicada en el área de TNDT y recopilada bajo la etiqueta JEA-2021 se clasificó en los siguientes grupos: técnicas de procesamiento, métricas y desempeño, modelos térmicos y simulaciones y, por último, aplicaciones.

A. Técnicas de procesamiento

En muy pocas ocasiones los defectos o información de interés presente en las imágenes térmicas de los materiales inspeccionados a partir de TNDT es fácilmente evidenciable. Además, las imágenes contienen implícitos efectos no deseados como vigneting, distorsión radial, reflexiones ambientales, variaciones de emisividad, calentamiento no uniforme, ruido, etc. [22]. Para eliminar la información no deseada es necesario el procesamiento de dichas imágenes. A través de los años se han desarrollado múltiples algoritmos de procesamiento, cuya selección depende del objetivo de la aplicación o campo de investigación. En la figura 1 se presenta una reciente clasificación realizada por [113] donde se encuentran los métodos de procesamiento más utilizados en TNDT

En [12] se muestra la extracción de información cuantitativa sobre resultados de la PPT, haciendo uso de la capacidad de las Redes Neuronales Artificiales (ANNs, del inglés: artificial

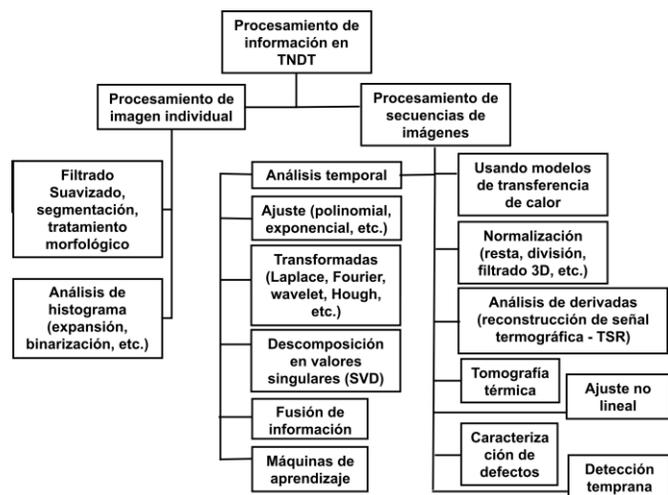


Fig. 1. Técnicas de procesamiento utilizadas en TNDT.

neural network) para resolver problemas complejos y no lineales a partir de información parcial y ruidosa. En este caso,

para el diseño de la red se utiliza un modelo térmico sencillo, encontrándose una limitación experimental entre la frecuencia de muestreo y la conductividad térmica del material inspeccionado, evidenciando que con la metodología propuesta en muestras de aluminio es necesario frecuencias de 140 Hz mientras que para muestras plásticas parece ser suficiente sólo de 14 Hz. Las ANNs también se han utilizado en la detección de defectos y estimación de su profundidad en materiales compuestos, fenómenos que están relacionados con problemas inversos que son de naturaleza compleja y no lineal, y que por lo tanto han representado una de las mayores limitantes para la ejecución de TNDT. No obstante, las ANNs se utilizan para proporcionar información cuantitativa sobre los defectos. El trabajo [23] presenta un modelo térmico 3D para materiales no homogéneos de tipo CFRP, implementando dos redes neuronales para detección de defectos y estimación de su profundidad. Por último, se confrontan y analizan los resultados teóricos obtenidos a partir del modelo térmico y los resultados obtenidos con ayuda de las redes neuronales.

Con el objetivo de extraer características y reducir la información redundante en secuencias de imágenes térmicas, como técnica para el procesamiento, es posible usar el Análisis por Componentes Principales (PCA, del inglés: principal component analysis), que proyecta los datos originales en un sistema de componentes ortogonales, surgiendo la técnica PCT [26].

En Colombia, en la Universidad del Valle se han realizado avances a nivel software para el análisis de imágenes IR. En [27] se presenta un sistema de visión artificial para imágenes infrarrojas el cual permite el procesamiento y análisis de esas imágenes a través de una interfaz gráfica desarrollada en JAVA, con la posibilidad de generar reportes de inspección y el almacenamiento de los resultados en una base de datos. Posteriormente, la aplicación TermoIR [18] con un mayor enfoque a TNDT permite la adquisición, procesamiento, análisis y caracterización de información térmica. Por último, en [28], se presenta un desarrollo software para fusión multimodal de imágenes térmicas y de espectro visible.

En Estados Unidos, la excitación óptica a partir de flash de potencia es el método más empleado en TNDT, ya que es rápido en comparación con otros métodos, y facilita la estimación cuantitativa de parámetros como grosor, profundidad o difusividad térmica. Se ha demostrado que la técnica de Reconstrucción de la Señal Termográfica (TSR, del inglés: thermographic signal reconstruction) [29] es efectiva para la reducción de ruido y, adicionalmente, su primera y segunda derivada proveen información que es invariante a condiciones ambientales, preparación de la superficie o energía de entrada; ayudando a evidenciar la presencia de anomalías al interior de las superficies inspeccionadas [30].

Para mejorar las diferencias térmicas entre regiones sanas y defectuosas de un material se han propuesto múltiples definiciones de contraste térmico (absoluto, dinámico, normalizado, estándar), las cuales necesitan utilizar como referencia valores de temperatura de una región sana del material a inspeccionar, situación que en la práctica no es fácil

¹ Ecuaciones de búsqueda utilizadas: i) Scopus: ALL("TNDT" AND "Thermography" AND "Composite materials"), ii) Web of Science: from All Databases TS=("TNDT" AND "Thermography" AND "Composite materials") y

iii) para la información recopilada bajo la etiqueta JEA-2021 se utilizaron fuentes de información mixtas (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, IEEEXplore, ResearchGate, QIRT Conference Open Archives, etc.).

de identificar y que limita su aplicación. Este inconveniente fue resuelto a partir de la definición del Contraste Absoluto Diferencial (DAC, del inglés: differential absolute contrast) [31], que recurre a la solución unidimensional de la ecuación de Fourier para materiales homogéneos y semi-infinitos estimulados por una función impulso; no obstante, el modelo no incluye el espesor de la muestra provocando que el método DAC pierda exactitud después de haber transcurrido un tiempo considerable después del impulso de excitación. Con base en este método Benítez et al. [32] mejoró esta propuesta al incluir en el análisis el grosor de la muestra a inspeccionar y el ancho del pulso térmico, permitiendo extender el rango de validez del DAC a tiempos mayores después de aplicado el pulso de excitación y generando así la versión modificada del DAC (mDAC, del inglés: modified differential absolute contrast).

En [33] se emplean estadísticas de alto orden para procesar imágenes IR comprimiendo la información disponible a partir de la secuencia típica en una sola imagen por cada inspección. Adicionalmente, se hace énfasis sobre la importancia del análisis automático de imágenes obtenidas en TNDT, reduciendo la intervención humana y posibles fuentes de error propias de su subjetividad.

Restrepo y Loaiza [34] presentan un algoritmo para la detección y corrección de píxeles anómalos en secuencias de imágenes térmicas resultantes de aplicar un procedimiento de termografía activa. Al contrario de técnicas clásicas de filtrado espacial, esta propuesta no afecta la apariencia global de cada imagen, ayudando a reducir errores de interpretación en etapas de procesamiento posteriores.

Marinetti y Cesaratto [35] documentan un método para la estimación de emisividad en un material que se fundamenta en funciones de calibración individuales para un sensor IR específico. La temperatura reflejada se mantiene en un valor constante durante la fase experimental sin necesidad de estimarla o conocer su valor. Finalmente se realiza una discusión sobre los resultados experimentales obtenidos en los valores de temperatura absoluta y relativa, para diferentes tipos de materiales usados comúnmente como referencia de emisividad.

En el trabajo de Ramirez, García y Castellanos [36] se implementa un algoritmo de segmentación en imágenes IR de un motor eléctrico, basado en el agrupamiento de información a partir de maximizar los valores esperados (esperanza), y en donde el desempeño se realiza a partir de su comparación con otro método de segmentación basado en fronteras usando como parámetro de evaluación el coeficiente de Dice.

Ibarra, Tarpani y Maldague [37] realizan una diferenciación entre técnicas básicas de procesamiento de imágenes como promedio, substracción, división, filtrado, detección de bordes y técnicas avanzadas de procesamiento que son comúnmente aplicadas en etapas de pre y pos procesamiento en TNDT. Los métodos avanzados son clasificados en diferentes grupos de acuerdo con el manejo de la información, resaltando aquellos basados en: contraste térmico, estadísticas, de factorización de matrices, transformadas y por último los que utilizan inteligencia artificial (redes neuronales y computación evolutiva).

Balageas [38] presenta que la técnica de termografía activa permite caracterizar propiedades termo físicas y defectos en estructuras complejas que presentan heterogeneidad, donde el

efecto térmico en los materiales es de naturaleza tridimensional (3D). En las cámaras térmicas modernas el tamaño de las imágenes se ha incrementado notablemente manteniendo una tendencia creciente, ante lo cual es necesario utilizar modelos unidimensionales para garantizar la implementación de algunos métodos de procesamiento de la información térmica. A partir de lo anterior, con el objetivo de conciliar esta realidad y lograr un procesamiento de secuencias de imágenes de una manera ágil y eficaz, se plantea un nuevo enfoque para la posible detección y caracterización temprana. Enfoque que se ilustra en varias aplicaciones y es comparado con métodos clásicos de análisis de información térmica, demostrando que la simplicidad de los modelos y cálculos es compatible con procesos de identificación exactos y eficientes.

Una técnica de procesamiento para mejorar el contraste térmico de una secuencia de imágenes térmicas adquiridas a partir de un ejercicio experimental de termografía activa se presenta en [18]. El procedimiento puede compensar el efecto óptico de vigneting y el efecto de calentamiento no uniforme de la superficie producido por la fuente de excitación de energía inyectada a la muestra inspeccionada utilizando un filtro mediana y sin depender de modelos de propagación de calor. Algunos de los resultados reportan una compensación efectiva por efectos de calentamiento no uniforme en comparación con técnicas como DAC, alcanzando una reducción de no uniformidad de fondo de hasta un 74 % a partir de un parámetro de no uniformidad definido bajo este estudio. El método inicialmente propuesto se complementa posteriormente realizando el truncamiento de valores de contraste negativos, alcanzando un desempeño por encima de 11 dB en Relación Señal Ruido (SNR, del inglés: signal-to-noise ratio) con respecto a las secuencias de imágenes analizadas [39].

A partir del conocimiento de los múltiples avances en herramientas de pre y pos procesamiento desarrollados en las dos últimas décadas para mejorar el desempeño de la termografía pulsada, en la detección y caracterización de defectos, trabajos como [40], [41] reconocen a la TSR y la detección temprana (del inglés: early detection) como dos de las más eficientes. Describen cómo los dos métodos son complementarios y pueden ser aplicados también cuando se utiliza la SHT. Teniendo en cuenta que la TSR se basa en el ajuste polinomial logarítmico de la evolución en el tiempo de la temperatura, Roche, Leroy y Balageas [42], [43] resaltan el uso de esta técnica para incrementar la eficiencia de la PT; aunque no permita el análisis de secuencias completas de imágenes, lo que es necesario en algunas aplicaciones como la inspección de estructuras. Con base en la limitación expuesta anteriormente, se ha propuesto un nuevo enfoque de pos procesamiento [42] que sólo hace uso de los tres coeficientes polinomiales más relevantes entregados por el método TSR clásico, que además mejora los tiempos de cómputo y produce una única imagen compuesta de defectos y sus profundidades, imagen representada en el modelo (RGB, del inglés: red, green, blue). Específicamente, en [43] se analizan secuencias de imágenes de materiales compuestos y de estructuras con daños reales, producto del proceso de fabricación o de impactos, a través de la generación de las imágenes RGB resultantes de la versión reducida de la TSR, y se comparan los resultados con las técnicas de Termografía de Fase Pulsada (PPT, del inglés: pulsed phase thermography) [44], Termografía de Componentes

Principales (PCT, del inglés: principal component thermography) [45] y con Estadísticos de Orden Superior (HOS, del inglés: high order statistics).

Vavilov y Chulkov en su trabajo [46] confirman la tendencia creciente en el campo del procesamiento de información para TNDT en los dominios temporal y espacial, gracias al cual es posible atenuar considerablemente muchos de los factores que producen ruido. En ese orden de ideas, se presenta el desarrollo de dos técnicas cuantitativas para TNDT: i) mapas de inercia térmica y ii) difusividad térmica, métodos que buscan establecer relaciones cuantitativas entre la severidad de defectos encontrados en una inspección y parámetros para toma de decisiones.

Restrepo y Loaiza [47] introducen dos enfoques de discretización por diferencias finitas para el modelo de propagación de calor 3D de Fourier, con lo cual se propone una nueva técnica para el mejoramiento del contraste térmico de secuencias de imágenes térmicas adquiridas usando PT en muestras de CFRP. Los dos enfoques se apoyan en modelos adaptables a una estructura de filtro espacial que puede ser aplicable a cada imagen térmica con el fin de obtener un mejor contraste térmico entre las posibles fallas y regiones sanas del material inspeccionado, generando así una mejor probabilidad para detección de defectos. El desempeño de la técnica propuesta es evaluado usando secuencias térmicas sintéticas generadas con ThermoCalc6L y con secuencias de imágenes reales de láminas de CFRP. Se obtiene un mejor contraste entre defectos y el fondo de la imagen comparado con mDAC, y una ejecución más rápida que las técnicas que se apoyan en una operación de reconstrucción de la distribución térmica del material como el método de filtrado térmico 3D [48]. Sobre esta línea Restrepo [49] propone un método robusto para caracterizar la profundidad de defectos contrastados a partir del mejoramiento de contraste en secuencias de imágenes térmicas. La técnica propuesta entrega buenos resultados para defectos superficiales y con mejor contraste. Sin embargo, disminuye su confiabilidad para aquellos que se encuentran a una mayor profundidad en el material y con menor contraste. Los resultados evidencian una reducción del error relativo promedio de aproximadamente la mitad.

Akhloufi y Verney [50] presentan avances en tecnologías 3D que facilitan el acceso a información de alta precisión a costos razonables. Las técnicas de visión 3D permiten la inspección avanzada, el análisis y la metrología en procesos de manufactura. Estas características combinadas con los desarrollos comprobados del TNDT para detección de defectos debajo de una superficie, genera un amplio potencial en la adquisición y fusión multimodal de información. El trabajo documenta resultados prometedores, mostrando cómo estas nuevas técnicas pueden ser aceptadas e implementadas de forma confiable y eficiente en procesos de manufactura a nivel aeroespacial y automotriz.

Pawar y Vavilov [51] expresan que las falsas detecciones relacionadas a las propiedades ópticas no uniformes sobre un material inspeccionado con termografía pulsada son un problema típico que se puede atenuar haciendo uso de técnicas de normalización. Para este caso se presenta una versión 3D del método conocido como normalización 1D (división de toda la secuencia de imágenes térmicas por una imagen), presentando como resultados la reducción de los efectos por calentamiento

no uniforme y difusión lateral del calor. Lo anterior se logra realizando el proceso de división de la secuencia de imágenes experimentales por una secuencia de imágenes sintéticas obtenida a partir de un modelo de transferencia de calor 3D.

Zhang y Maldague [52] describen la implementación de una Transformada de Contorno sin Submuestreo (NSCT, del inglés: nonsubsampling contourlet transform) que se soporta bajo un enfoque multimodal de fusión de imágenes (IR y espectro visible). En sus resultados experimentales y a partir de la percepción humana, el proceso de fusión propuesto evidencia su efectividad y ventajas en relación con aspectos como escalas múltiples, resolución múltiples e invariancia a la traslación, frente a métodos de análisis como la transformada Wavelet. Adicionalmente, su eficiencia y robustez se analizan a partir de diferentes indicadores como desviación estándar, entropía de Shannon, error cuadrático medio, índice de información mutua e índice de similitud basada en bordes.

B. Métricas de desempeño

Para evaluar las técnicas de procesamiento de información térmica es importante disponer de indicadores de desempeño que permitan cuantificar sus resultados con criterios objetivos. A continuación se describen algunos de los indicadores de desempeño que se encontraron en la literatura científica consultada:

Teniendo en cuenta la existencia de Ruido No Uniforme (NUN, del inglés: nonuniformity noise) en los sensores de captura de las cámaras IR, San Martín, Torres y Pezoa [53] proponen el índice de Aspereza Efectivo (ERO, del inglés: effective-roughness) que no necesita una imagen de referencia para evaluar el desempeño de métodos de corrección de no uniformidad propuestos en la literatura.

Vavilov [54] reporta que en TNDT uno de los principales problemas inherentes a la técnica es la presencia de ruido en la señal IR, donde se introducen dos tipos de ruido: (1) de tipo aditivo, definido por las reflexiones del entorno y el detector IR; y (2) de tipo multiplicativo, que se atribuye a características propias del material en términos de variaciones en su emisividad. La realización de varios experimentos a diferentes materiales ha mostrado que en ninguno de estos se encuentra un ruido aditivo puro o un ruido multiplicativo puro. Sin embargo, con calentamiento óptico, algunos materiales compuestos con superficies de alta emisividad (generalmente negras) evidenciaron ruido multiplicativo con un índice de contraste de ruido entre 2 y 5 %. Este índice se define como la relación entre la desviación estándar del ruido y el valor medio de la temperatura en una zona no defectuosa del material inspeccionado.

Por su parte, en [55] se afirma que normalmente la evaluación de los métodos de procesamiento dependen del concepto subjetivo emitido por el personal experto, quien se encarga de interpretar las imágenes y determina con qué técnica se evidencian de forma visible los defectos. La SNR es un indicador cuantitativo relacionado con la visibilidad de los defectos, pero es un parámetro local y variable en función del tiempo. En ese sentido el autor propone un método para la Evaluación de la Calidad de Imagen (IQA, del inglés: image quality assessment) soportado en métricas que permiten

cuantificar el mejoramiento del contraste obtenido después de aplicar técnicas de procesamiento de imágenes en TNDT.

García, Benitez, Castellano y Ramirez [56] proponen un algoritmo de evaluación de calidad que no requiere definir referencias (regiones o imágenes) para la evaluación de desempeño de diferentes técnicas de procesamiento en TNDT. Con el estudio se encuentra una fuerte correlación entre el método de evaluación propuesto y la evaluación subjetiva realizada por un humano. Adicionalmente, se reporta una relación con la densidad espectral de potencia espacial y algunos coeficientes Wavelet.

Lopez, Maldague e Ibarra [57] examinan diferentes métodos de procesamiento: DAC, TSR, PPT y PLSR. El desempeño de los métodos se analiza en términos de la relación señal ruido y el contraste máximo. Este trabajo se complementa en [57] y usando los indicadores de desempeño del trabajo previo, se evalúan las técnicas TSR y PLSR aplicadas a una muestra de CFRP con inserciones de Teflón para generar los defectos. Los autores discuten sobre el rendimiento de los métodos, sus limitaciones y sus ventajas. También se mencionan los principales aspectos que afectan el ejercicio de la PT (reflexiones ópticas, variaciones de emisividad, calentamiento no uniforme y difusión de calor no uniforme).

En [58] se realiza una revisión de los alcances obtenidos con la TSR para la detección de defectos en estructuras, comparando su desempeño con métodos de procesamiento reconocidos ampliamente en la literatura como: PPT, PCT y HOS. Adicionalmente, ante la necesidad de realizar una comparación objetiva sobre la efectividad de estos métodos de procesamiento usados en TNDT, Balageas, Roche y Leroy [59] utilizan como métricas de desempeño la relación contraste ruido, la forma de los bordes y la extensión lateral de los defectos, teniendo en cuenta que algunos trabajos previos sólo mencionan variaciones de la relación señal ruido presente en las imágenes térmicas. Las definiciones anteriores se aplican seleccionando manualmente filas o columnas de píxeles que se encuentren en los centros de los defectos identificados.

Por último, Liu, Zhang, Fernandes y Maldague [60] presentan la aplicación de diferentes métodos de procesamiento de imágenes: sustracción de imagen fría, PCT, TSR y la transformada de Fourier a imágenes térmicas obtenidas a partir de vibrotermografía y PT. La discusión de los resultados obtenidos se realiza en función de los métodos de excitación utilizados.

C. Simulación y modelos térmicos

Los modelos analíticos y numéricos son comúnmente utilizados en simulaciones relacionadas con TNDT, por lo que a continuación se relacionan algunos de los trabajos que se consultaron.

En [61] se compara el desempeño de cuatro paquetes software para simulación numérica de problemas en TNDT (ThermoCalc-2D, ThermoCalc-6L, ThermoModel y Comsol Multiphysics), en términos de cálculos de temperaturas absolutas y algunos parámetros térmicos (señales de temperatura diferenciales y contraste dinámico).

En [62] se realiza la descripción de una metodología para modelar y simular un ejercicio de termografía pulsada. Se utiliza un modelo térmico basado en la ecuación de

transferencia de calor en 3D sobre un medio heterogéneo cuando un pulso térmico es aplicado a la superficie del material.

A partir de la estimulación por ultrasonido y óptica, se han generado estudios que documentan ejemplos de caracterización de daños por impacto, presentando la solución analítica de un problema termo mecánico de fricción interna en fisuras de grosor casi nulo [63]. Posteriormente en [64] se muestran soluciones numéricas y analíticas de modelos donde los materiales defectuosos han sido objeto de estimulación térmica e incluyen estudios de comparación entre modelos de transferencia de calor 1D, 2D y 3D para definir el nivel de exactitud de las soluciones.

En [65], se utiliza el criterio Tanimoto y la información de simulaciones por elementos finitos con el software COMSOL, para analizar imágenes térmicas obtenidas usando diferentes medios de excitación (pulsada, modulada, vibrotermografía e iluminación con tecnología de Diodos Emisores de Luz (LED, del inglés: light emitting diode)). Lo anterior con la finalidad de detectar inserciones en Teflón sobre láminas de CFRP. Por último, en [66] se desarrolla un enfoque inverso para el problema de transferencia de calor con la finalidad de caracterizar el tamaño y profundidad de defectos subsuperficiales en materiales compuestos. El procedimiento se basa en la reconstrucción del perfil de fase usando una simulación por elementos finitos de un experimento de LT. La técnica aplica un método híbrido entre un algoritmo de simulación y otro de búsqueda para determinar el tamaño y profundidad de los defectos en láminas de CFRP. Lo anterior, encontrando una solución óptima para una función objetivo construida con información del perfil de fase del experimento LT y una solución numérica. Con esta estrategia se reportan errores menores al 5 % y 4 % para tamaño y profundidad, respectivamente.

D. Aplicaciones

Los rangos de aplicación relacionados con TNDT son notablemente amplios y en expansión. Comprende áreas como la medicina y la biología, la electrónica, los semiconductores, la inspección de patrimonio histórico, las aplicaciones industriales, los procesos de fabricación y control de calidad, así como tareas de mantenimiento, entre otros. A continuación, se presentan algunos ejemplos de trabajos asociados con algunas áreas de aplicación del TNDT.

En obras civiles es viable la detección de anomalías a partir de una revisión del comportamiento y estado térmico de las estructuras [67], relacionando el estado transitorio de tensión y estrés del material inspeccionado ocasionado por la relación existente entre fenómenos mecánicos y efectos térmicos. Bajo otro enfoque, más relacionado con el TNDT clásico, los daños se detectan, localizan y caracterizan por las perturbaciones que se introducen en las propiedades térmicas locales de la estructura (conducción, difusión, capacidad de calor, efusividad, resistencia térmica). En los últimos años han aparecido nuevas opciones de materiales para tuberías, principalmente basados en polímeros compuestos, sustituyendo así los materiales tradicionales, ante lo cual es posible realizar la inspección de tuberías con TNDT [68]. Por otra parte, Milovanovic y Pecur [69] realizan un recorrido a través de los principales avances en el uso de TNDT para detección y caracterización de defectos bajo el enfoque activo sobre

concreto reforzado. También, presentan una revisión acerca de los principios físicos, equipos de inspección y métodos de procesamiento involucrados.

En el área biomédica algunas aplicaciones derivan sus resultados del análisis de imágenes térmicas; por ejemplo, en la identificación biométrica utilizando imágenes IR de la red vascular de la cara dorsal de la mano [70]. El uso de IRT representa una herramienta valiosa para detectar síndrome de Túnel Carpiano [71], al aplicar técnicas para registro y extracción de características de las imágenes térmicas que permite realizar una comparación entre sujetos sanos y aquellos que presentan el síndrome. De manera similar en [72] se presenta la aplicación del método TSR para observar el comportamiento térmico en regiones vasculares de un ser humano, encontrando diversas evidencias sobre los patrones de calentamiento entre venas y válvulas venosas, permitiendo así su identificación y funcionalidad. También se han logrado avances como apoyo en la detección de anomalías en las imágenes IR de zonas mamarias [73], [74]. Y se han desarrollado sistemas de visión por computador multispectrales en tiempo real para el análisis morfo-térmico de la huella plantar [75].

En aplicaciones industriales, Roche y Balageas [76] describen una implementación práctica en una línea de producción para representar mapas de profundidad de defectos al aplicar TNDT para la inspección de materiales compuestos. El resultado es similar a los producidos por un escáner ultrasónico, permitiendo la detección de daños en el material originados por defectos de fabricación o por eventos fortuitos. También se encuentran trabajos relacionados con el uso de termografía para la medición de temperatura de bombillos LED de alta definición, comúnmente utilizados en los faros delanteros de los automóviles. Las lecturas térmicas resultantes son comparadas con datos de temperatura generados a partir de simulaciones [77]. Por otra parte, se ha propuesto utilizar termografía activa conjuntamente con métodos de procesamiento de información térmica para la inspección de tuberías de acero y estimación de la cantidad de agua remanente en estas estructuras [78]. Por último, en [79] se expone un procedimiento para la reconstrucción de impedancia térmica a partir de mediciones infrarrojas de la superficie de un dispositivo electrónico.

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Con la revisión de la literatura y la organización de la información relacionada en las secciones anteriores, es posible documentar algunas tendencias a nivel de publicaciones en el área de TNDT, así como la producción académica por país y por autor en la última década, obteniendo así los resultados registrados en las figuras 2, 3, 4, 5 y 6.

La figura 2 presenta, en una ventana de tiempo entre el año 2010 y el 2021, el número de publicaciones a nivel mundial en el área de TNDT usando como fuente de información Scopus y la ecuación de búsqueda que acompaña la Tabla 1 (columna 2). La tendencia creciente en el número de registros coincide con la reportada en [25]. El número máximo de artículos publicados se presenta en el año 2019 con 339 publicaciones lo cual equivale al 15.7 % del total de registros dentro de la ventana de observación; y aunque para el siguiente año se aprecia una leve

disminución, el número de publicaciones del año 2020 (307 artículos, 14.2 %) sigue siendo mayor que el alcanzado en el año 2018 (292 artículos, 13.5 %), fecha anterior al pico máximo.



Fig. 2. Publicaciones en TNDT por año a nivel mundial entre 2010 y 2021.

Las figuras 3 y 4 muestran la producción académica organizada por país en la misma ventana de tiempo (2010-2021). Para este ejercicio se utilizó como fuente de información los registros etiquetados como JEA-2021 (Tabla 1 columna 4). En estas gráficas se identifica la contribución que diferentes naciones a nivel mundial están realizando en el área de TNDT. Con barras se representa la contribución en publicaciones por Autor Principal (AP). La línea continua complementa el indicador anterior incluyendo las coautorías (Co). A partir del primer criterio (AP), se identifican países como Canadá, Francia y Rusia con 15, 13 y 11 publicaciones, respectivamente (Figura 3). Usando el mismo criterio, únicamente se identifica en América Latina la contribución de Colombia, Brasil, Chile y México con 17, 5, 2 y 1 publicaciones, respectivamente (Figura 4). Con el segundo criterio, incluyendo las coautorías (AP + Co), Canadá incrementa sus registros a 59, Francia a 28 y Rusia a 21 (Figura 3). Por su parte, en América Latina, Colombia



Fig. 3. Número de publicaciones en TNDT por país entre 2010 y 2021 en el contexto mundial.

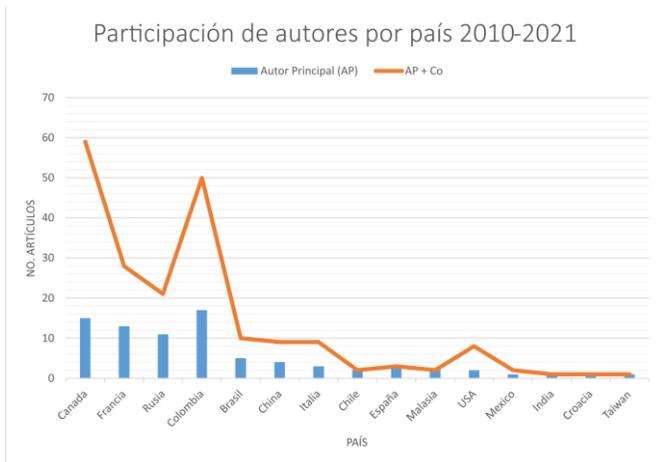


Fig. 4. Número de publicaciones en TNDT por país entre 2010 y 2021 en el contexto de América Latina.

suma 50 registros en publicaciones académicas, seguido de Brasil con 10, Chile con 2 y por último México con 2 (Figura 4). Con base en la información anterior, es notoria una mayor participación de autores con afiliación canadiense, francesa o rusa con respecto al resto de países. Estos investigadores han permitido que otros científicos de países emergentes en el campo de TNDT, como es el caso de América Latina, contribuyan y propongan desarrollos en los últimos años. También es evidente el pobre desarrollo y contribuciones encontrados en el resto de los países que conforman América Latina. Lo anterior, posiblemente se debe a que la ecuación de búsqueda utilizada en esta investigación haya excluido evidencias de la producción académica, que efectivamente no existan desarrollos publicados en el área de TNDT, que no se están realizando ejercicios bajo este enfoque o que las prácticas en las otras regiones del continente americano en términos de NDT aún no involucren o promuevan la termografía infrarroja (activa).

Las figuras 5 y 6 presentan la producción académica organizada por autor para la misma ventana de tiempo (2010-2021) y utilizando la misma fuente de información que el ejercicio anterior, los registros etiquetados como JEA-2021 (Tabla 1 columna 4). De igual forma, con barras se representa la contribución en publicaciones por (AP) y la línea continua complementa el indicador anterior incluyendo además las coautorías. Como autor principal aparecen investigadores ampliamente conocidos en la literatura académica relacionada con TNDT. A nivel mundial se destacan nombres como Vavilov, Balageas, Maldague, Roche, Marinetti e Ibarra con 10, 9, 6, 4, 4 y 2 publicaciones (Figura 5). Por su parte, a nivel de América Latina aparecen investigadores como Benítez, Restrepo, Lopez, Erazo, Flórez y Fernández con 6, 6, 4, 3, 2 y 1 artículos (Figura 6). Incluyendo las coautorías (AP + Co), se observa que investigadores como Maldague incrementan el número de su producción a 29, Ibarra y Vavilov a 15, Balageas a 13, Roche a 9 y Marinetti a 5 (Figura 5). A nivel de América Latina, aparece Loaiza con 14 artículos en coautoría, Benítez y Restrepo con 11, López con 6, Erazo con 4, Fernández con 2 y

Florez continúa con 2, lo que significa que sólo ha contribuido como AP (Figura 6). El nivel de participación de la mayoría de los investigadores como AP (gráfico de barras) se incrementa cuando la información se complementa con las coautorías (información que se representa en el gráfico como una línea continua).



Fig. 5. Número de publicaciones en TNDT por autor entre 2010 y 2021 en el contexto mundial.

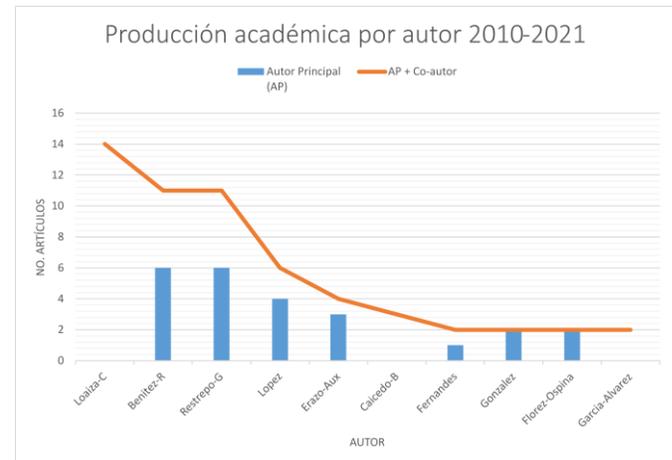


Fig. 6. Número de publicaciones en TNDT por autor entre 2010 y 2021 en el contexto de América Latina.

V. CONCLUSIONES

Actualmente se presenta una tendencia creciente en producción académica relacionada con ensayos no destructivos por termografía infrarroja. Esta tendencia confirma que es un área de conocimiento vigente y con un amplio potencial de desarrollo en el futuro inmediato. Además, con alto interés para diferentes industrias, principalmente en sectores como el militar, el aeroespacial, el naval, el automotriz, en biomédica y más recientemente en salud estructural.

Existe una división bien definida para clasificar los métodos utilizados en el procesamiento de información térmica. La

división consta de dos grupos: el primero que reúne todos las técnicas orientadas al procesamiento de imágenes individuales y el segundo grupo que está conformado por los métodos orientados al procesamiento de secuencias de imágenes térmicas. Actualmente, este segundo conjunto es el que presenta un desarrollo mayor incluyendo trabajos relacionados al mejoramiento de contraste térmico, estadísticas de orden superior, factorización de matrices, transformaciones matemáticas y el uso de técnicas avanzadas de inteligencia artificial [23][46]. Entre las técnicas más reconocidas y citadas por los autores consultados se encuentran la reconstrucción de señales termográficas, el contraste absoluto diferencial, la termografía de fase pulsada, la termografía de componentes principales, la reconstrucción por mínimos cuadrados parciales y la detección temprana. Por su parte, autores de origen latinoamericano han propuesto técnicas como el contraste absoluto diferencial modificado, el contraste térmico por diferencias finitas, la compensación térmica de fondo por filtrado y por reconstrucción. A la par de lo anterior, se identifica que existe una tendencia para que las nuevas técnicas de procesamiento se dirijan a procesos de análisis automáticos y cuantitativos sobre secuencias de imágenes.

La evaluación de desempeño para las técnicas de procesamiento es un tema que ha presentado algunos avances en los últimos años [32][80][56][36][17][53] utilizando enfoques como la relación señal-ruido, el criterio Tanimoto y la probabilidad de detección. Sin embargo, la creciente aparición de nuevas técnicas de procesamiento exige desarrollos en indicadores de desempeño que permitan inferir de manera objetiva, preferiblemente cuantitativa acerca de la eficiencia de los métodos evaluados, sus ventajas y limitaciones.

Países como Canadá, Francia, Rusia y Estados Unidos tienen una trayectoria amplia y reconocida en prácticas relacionadas con termografía infrarroja con lo cual generan avances y publicaciones de forma continua. Los investigadores adscritos a universidades, grupos y/o centros de investigación con sede en estos países han sido los responsables de fomentar y realizar transferencia de conocimiento a investigadores de otras naciones emergentes como Brasil, Colombia, México y Chile.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (Colciencias); Convocatoria 727 de 2015. Igualmente, a la Institución Universitaria Antonio José Camacho (UNIAJC). Proyectos de Investigación PD0916 y PD0121.

REFERENCIAS

- [1] X. Maldague, *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. New York: John Wiley-Interscience, 2001.
- [2] D. Balageas *et al.*, "Thermal (IR) and Other NDT Techniques for Improved Material Inspection," *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 35, no. 1, pp. 1–17, 2016, doi: 10.1007/s10921-015-0331-7.
- [3] C. Ibarra, "Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase," Laval University, 2005.
- [4] V. P. Vavilov, "Thermal non destructive testing: short history and state-of-art," in *QIRT 92 - Eurotherm Series 27*, 1992, pp. 179–194, doi: <http://dx.doi.org/10.21611/qirt.1992.028>.
- [5] D. L. Balageas, J. C. Krapez, and P. Cielo, "Pulsed photothermal modeling of layered materials," *J. Appl. Phys.*, vol. 59, no. 2, pp. 348–357, Jan. 1986, doi: 10.1063/1.336690.
- [6] V. P. Vavilov and R. Taylor, "Theoretical and practical aspects of the thermal NDT of bonded structures," *Res. Tech. NDT*, vol. 5, no. N.A., pp. 239–280, 1982.
- [7] P. V. MacLaughlin and H. G. Mirchandani, "Aerostructure NDT evaluation by thermal field detection (Phase II). Final Rep.," *AIRTASK, Nav. Air Syst. Command AIR- 310G*, vol. N.A., no. N.A., p. N.A, 1984.
- [8] Y. A. Popov, K. A. E., V. A. Stokov, and E. Al., "Thermal NDT of multi-layer structures," *Defectoscopiya (Russ. J. Nondestr. Test.)*, vol. 3, no. N. A., pp. 76–81, 1976.
- [9] V. Vavilov, "Thermal Non-Destructive Testing: Short History, State-of-the-Art and Trends," *Image Process.*, 1995.
- [10] X. Maldague, J. C. Krapez, and D. Poussart, "Thermographic Nondestructive Evaluation (NDE): An Algorithm for Automatic Defect Extraction in Infrared Images," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 20, no. 3, pp. 722–725, 1990, doi: 10.1109/21.57287.
- [11] X. Maldague and S. Marinetti, "Pulse phase infrared thermography," *J. Appl. Phys.*, vol. 79, no. 5, p. 2694, 1996, doi: <https://doi.org/10.1063/1.362662>.
- [12] X. Maldague, Y. Largouët, and J.-P. Couturier, "A study of defect depth using neural networks in pulsed phase thermography: modelling, noise, experiments," *Rev. Générale Therm.*, vol. 37, pp. 704–717, 1998, doi: 10.1016/S0035-3159(98)80048-2.
- [13] D. Pan, Z. Jiang, W. Gui, K. Jiang, and X. Maldague, "Compensation Method for the Influence of Dust in Optical Path on Infrared Temperature Measurement," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 70, pp. 1–11, 2021, doi: 10.1109/TIM.2020.3012015.
- [14] D. Pan, Z. Jiang, X. Maldague, and W. Gui, "Research on the Influence of Multiple Interference Factors on Infrared Temperature Measurement," *IEEE Sens. J.*, pp. 1–1, Jan. 2021, doi: 10.1109/jSEN.2021.3055757.
- [15] J. Erazo-Aux, H. Loaiza-Correa, A. D. Restrepo-Giron, C. Ibarra-Castaneda, and X. Maldague, "Thermal imaging dataset from composite material academic samples inspected by pulsed thermography," *Data Br.*, vol. 32, no. 106313, pp. 1–6, 2020, doi: 10.1016/j.dib.2020.106313.
- [16] D. L. Balageas, "Termografía Infrarroja : una técnica multifacética para la Evaluación No Destructiva (END)," *IV Conf. Panam. END*, no. January 2007, p. 14, 2007.
- [17] H. D. Benitez, "Contribución a la Caracterización de Defectos en Termografía Infrarroja mediante Máquinas de Aprendizaje," Universidad del Valle, 2008.
- [18] A. D. Restrepo-Girón, "Contribucion a la Solucion del Problema de Detección y Caracterización de Defectos en Termografía Activa mediante Procesamiento Espacio-Temporal de Secuencias de Imágenes Infrarrojas," 2013.
- [19] M. Z. Umar, V. Vladimir, H. Abdullah, and A. K. Ariffin, "Ultrasonic infrared thermography in non- destructive testing : A review," *Russ. J. Nondestruct. Test.*, vol. 52, no. April, pp. 212–219, 2016, doi: 10.1134/S1061830916040082.
- [20] A. O. Chulkov and V. P. Vavilov, "Hardware and Software for Thermal Nondestructive Testing of Metallic and Composite Materials," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 671, no. January, p. 012011, 2016, doi: 10.1088/1742-6596/671/1/012011.
- [21] V. P. Vavilov, A. O. Chulkov, D. A. Derusova, and Y. Pan, "Thermal NDT research at Tomsk Polytechnic University," *Quant. Infrared Thermogr. J.*, no. January, pp. 1–16, 2016, doi: 10.1080/17686733.2015.1131855.
- [22] F. Khodayar, S. Sojasi, and X. Maldague, "Infrared thermography and NDT: 2050 horizon," *Quant. Infrared Thermogr. J.*, vol. 6733, no. July, pp. 1–22, 2016, doi: 10.1080/17686733.2016.1200265.
- [23] V. P. Vavilov and D. D. Burleigh, "Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing," *NDT E Int.*, vol. 73, pp. 28–52, 2015, doi: 10.1016/j.ndteint.2015.03.003.
- [24] V. Vavilov, "Thermal NDT: historical milestones, state-of-the-art and trends," *Quant. Infrared Thermogr. J.*, vol. 11, no. 1, pp. 66–83, 2014, doi: 10.1080/17686733.2014.897016.
- [25] D. L. Balageas, "A brief history of QIRT concept, structures and community," *Quant. Infrared Thermogr. J.*, vol. 13, no. 1, pp. 109–125, 2016, doi: 10.1080/17686733.2015.1131852.
- [26] S. Marinetti *et al.*, "Statistical analysis of IR thermographic sequences by PCA," *Infrared Phys. Technol.*, vol. 46, no. 1-2 SPEC.

- ISS., pp. 85–91, 2004, doi: 10.1016/j.infrared.2004.03.012.
- [27] H. Benítez, H. Loaiza, B. Bacca, and J. Acevedo, “Sistema de Vision Artificial para el Procesamiento y Analisis de Imagenes Infrarrojas,” *XI Symp. Image, Signal Process. Artif. Vision, STSIVA [Disponible en CD]*.
- [28] R. E. Ospina, S. D. Cardona, and B. Bacca-Cortes, “Software tool for thermographic inspection using multimodal fusing of thermal and visible images,” *Ing. y Compet.*, vol. 19, no. 1, pp. 53–68, 2017, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/inco/v19n1/0123-3033-inco-19-01-00053.pdf>.
- [29] S. M. Shepard, “Advances in pulsed thermography,” in *Thermosense XXIII*, 2001, pp. 511–516, doi: 10.1117/12.421032.
- [30] S. M. Shepard, “Flash Thermography of Aerospace Composites 2. Thermographic Signal Reconstruction,” in *IV Conferencia Panamericana de END Buenos*, 2007, vol. IV, no. Octubre, pp. 2–7, [Online]. Available: <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/132.pdf>.
- [31] M. Pilla, M. Klein, X. Maldague, and A. Salerno, “New absolute contrast for pulsed Thermography,” in *6th Conference on Quantitative Infrared Thermography*, 2002, pp. 53–58.
- [32] H. Benítez, X. Maldague, C. Ibarra-Castanedo, H. Loaiza, A. Bendada, and E. Caicedo, “Modified differential absolute contrast using thermal quadrupoles for the nondestructive testing of finite thickness specimens by infrared thermography,” *Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, no. May, pp. 1039–1042, 2007, doi: 10.1109/CCECE.2006.277741.
- [33] F. J. Madruga, C. Ibarra-Castanedo, O. M. Conde, J. M. López-Higuera, and X. Maldague, “Infrared thermography processing based on higher-order statistics,” *NDT E Int.*, vol. 43, no. 8, pp. 661–666, 2010, doi: 10.1016/j.ndteint.2010.07.002.
- [34] A. D. Restrepo Girón and H. Loaiza Correa, “A new algorithm for detecting and correcting bad pixels in infrared images,” *Ing. E Investig.*, vol. 30, no. 2, pp. 197–207, 2010.
- [35] S. Marinetti and P. G. Cesaratto, “Emissivity estimation for accurate quantitative thermography,” *NDT E Int.*, vol. 51, pp. 127–134, 2012, doi: 10.1016/j.ndteint.2012.06.001.
- [36] T. J. Ramirez-Rozo, J. C. Garcia-Alvarez, and C. G. Castellanos-Dominguez, “Infrared thermal image segmentation using expectation-maximization-based clustering,” *STSIVA 2012 - 17th Symp. Image, Signal Process. Artif. Vis.*, pp. 223–226, 2012, doi: 10.1109/STSIVA.2012.6340586.
- [37] C. Ibarra-Castanedo, J. R. Tarpani, and X. P. V Maldague, “Nondestructive testing with thermography,” *Eur. J. Phys.*, vol. 34, no. November, pp. S91–S109, 2013, doi: 10.1088/0143-0807/34/6/S91.
- [38] D. Balageas, “In search of early time ... - Article 2013,” *Adv. Opt. Technol.*, vol. 2013, no. January 2013, pp. 1–13, 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/314906>.
- [39] A. D. Restrepo-Girón and H. Loaiza-Correa, “Background Thermal Compensation by Filtering for Contrast Enhancement in Active Thermography,” *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 35, no. 1, pp. 1–11, 2016, doi: 10.1007/s10921-016-0336-x.
- [40] D. Balageas and J. Roche, “Common tools for quantitative time resolved pulse and step heating thermography part I theoretical basics,” 2014, no. July, doi: 10.13140/2.1.2645.4402.
- [41] J. M. Roche and D. Balageas, “2014-Common tools for quantitative time resolved pulse and step heating thermography part II: experimental validation,” *QIRT 2014 Conf.*, no. July, 2014, doi: 10.13140/2.1.1334.7207.
- [42] J. Roche, F. Leroy, and D. L. Balageas, “Information condensation in defect detection using TSR coefficients images,” *QIRT2014 Conférence*, no. 1, 2014, doi: 10.13140/2.1.1596.8648.
- [43] J.-M. Roche and D. L. Balageas, “Detection and characterization of composite real-life damage by the TSR-polynomial coefficients RGB-projection technique,” in *Proceedings of the 2014 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, 2014, vol. 0, no. July, pp. 1–10, doi: 10.21611/qirt.2014.010.
- [44] X. Maldague, F. Galmiche, and A. Ziadi, “Advances in pulsed phase thermography,” *Infrared Phys. Technol.*, vol. 43, no. 3–5, pp. 175–181, 2002, doi: 10.1016/S1350-4495(02)00138-X.
- [45] N. Rajic, “Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures,” *Compos. Struct.*, vol. 58, no. 4, pp. 521–528, Dec. 2002, doi: 10.1016/S0263-8223(02)00161-7.
- [46] V. P. Vavilov and A. O. Chulkov, “Thermal NDT of Composites in the Aero Space Industry: A Quantitative Approach,” in *11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)*, 2014, no. Econdt, pp. 1–10.
- [47] A. D. Restrepo-Giron and H. Loaiza-Correa, “New 3D Finite Difference Method for Thermal Contrast Enhancement in Slabs Pulsed Thermography Inspection,” *J. Nondestruct. Eval.*, pp. 62–73, 2013, doi: 10.1007/s10921-013-0203-y.
- [48] E. Grinzato, B. Bison P.G., S. Marinetti S., and Vavilov V., “Thermal NDE enhanced by 3D numerical modeling applied to works of art,” *15th World Conference on Non-destructive Testing, Rome, Italy*, 2000. <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn909/idn909.htm> (accessed Mar. 07, 2017).
- [49] A. D. Restrepo Girón, “Enhanced method for flaws depth estimation in CFRP slabs from FDT thermal contrast sequences,” *Ing. e Investig.*, vol. 35, no. 3, pp. 61–68, 2015, doi: 10.15446/ing.investig.v35n3.50552.
- [50] M. A. Akhloufi and B. Verney, “Multimodal registration and fusion for 3D thermal imaging,” *Math. Probl. Eng.*, 2015, doi: 10.1155/2015/450101.
- [51] S. S. Pawar and V. P. Vavilov, “Applying the heat conduction-based 3D normalization and thermal tomography to pulsed infrared thermography for defect characterization in composite materials,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 94, pp. 56–65, 2016, doi: 10.1016/j.jheatmasstransfer.2015.11.018.
- [52] Q. Zhang and X. Maldague, “An adaptive fusion approach for infrared and visible images based on NSCT and compressed sensing,” *Infrared Phys. Technol.*, vol. 74, pp. 11–20, 2016, doi: 10.1016/j.infrared.2015.11.003.
- [53] C. San Martin, S. N. Torres, and J. E. Pezoa, “An effective reference-free performance metric for non-uniformity correction algorithms in infrared imaging system,” *Conf. Proc. - Lasers Electro-Optics Soc. Annu. Meet.*, pp. 576–577, 2007, doi: 10.1109/LEOS.2007.4382537.
- [54] V. Vavilov, “Noise-limited thermal/infrared nondestructive testing,” *NDT E Int.*, vol. 61, pp. 16–23, 2014, doi: 10.1016/j.ndteint.2013.09.002.
- [55] H. D. Benitez Restrepo, “Objective Image Quality Assessment in infrared non-destructive testing,” in *2012 XVII Symposium of Image, Signal Processing, and Artificial Vision (STSIVA)*, Sep. 2012, pp. 122–127, doi: 10.1109/STSIVA.2012.6340568.
- [56] J. C. Garcia Alvarez, H. D. Benitez Restrepo, G. Castellano Dominguez, and T. Ramirez, “Non referenced Quality Assessment of Image Processing Methods in Infrared Non-destructive Testing ICIAP 2013,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 8156, no. PART 1, pp. 722–732, 2013, doi: 10.1007/978-3-642-41181-6.
- [57] F. Lopez, X. Maldague, and C. Ibarra-Castanedo, “Enhanced image processing for infrared non-destructive testing,” *Opto-Electronics Rev.*, vol. 22, no. 4, Jan. 2014, doi: 10.2478/s11772-014-0202-2.
- [58] D. Balageas, J. Roche, and F. Leroy, “Quantitative Assessment of Defect Characterisation Using the TSR Coefficient Images,” in *QIRT-Asia*, 2015, no. October, pp. 1–11.
- [59] D. L. Balageas, J.-M. Roche, and F.-H. Leroy, “Comparison and ranking procedure for an objective assessment of thermographic NDE methods,” *Proc. 2016 Int. Conf. Quant. InfraRed Thermogr.*, no. July, 2016, doi: 10.21611/qirt.2016.003.
- [60] B. Liu, H. Zhang, H. Fernandes, and X. Maldague, “Quantitative Evaluation of Pulsed Thermography, Lock-in Thermography and Vibrothermography on Foreign Object Defect (FOD) in CFRP,” *Sensors*, vol. 16, no. 5, p. 743, 2016, doi: 10.3390/s16050743.
- [61] V. Vavilov, S. Marinetti, and D. Nesteruk, “Accuracy issues in modeling thermal NDT problems,” in *Proceedings Volume 6939, Thermosense XXX*, 2008, no. March, p. 693913, doi: 10.1117/12.775684.
- [62] F. Lopez, V. De Paulo Nicolau, C. Ibarra-Castanedo, and X. Maldague, “Thermal-numerical model and computational simulation of pulsed thermography inspection of carbon fiber-reinforced composites,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 86, pp. 325–340, 2014, doi: 10.1016/j.jthermalsci.2014.07.015.
- [63] V. Vavilov, W. Š, and D. Derusova, “Ultrasonic and optical stimulation in IR thermographic NDT of impact damage in carbon composites,” *Quant. infrared Thermogr.*, pp. 2–6, 2014, doi: 10.1080/17686733.2015.1046678.
- [64] V. P. Vavilov, “Modeling thermal NDT problems,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 72, pp. 75–86, 2014, doi: 10.1016/j.jheatmasstransfer.2013.12.084.

- [65] S. Sojasi *et al.*, "Infrared Testing of CFRP Components: Comparisons of Approaches using the Tanimoto Criterion," in *NDT in Canada 2015 Conference*, 2015, pp. 1–8.
- [66] G. Jinlong, L. Junyan, W. Fei, and W. Yang, "Inverse heat transfer approach for nondestructive estimation of the size and depth of subsurface defects of CFRP composite using lock-in thermography," *Infrared Phys. Technol.*, vol. 71, pp. 439–447, 2015, doi: 10.1016/j.infrared.2015.06.005.
- [67] D. L. Balageas, "Thermal Imaging Methods," *Encycl. Struct. Heal. Monit.*, no. August, 2008, doi: 10.1002/9780470061626.shm018.
- [68] A. Pereira F., J. Diniz M., C. Paskocimas, S. Nóbrega, F. de Araujo M., and A. Ricalde R., "Addition of magnetic markers for non-destructive evaluation of polymer composites," *Mater. Res.*, vol. 14, no. 4, pp. 508–513, Dec. 2011, doi: 10.1590/S1516-14392011005000071.
- [69] B. Milovanović and I. B. Pečur, "Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete," *J. Imaging*, vol. 2, no. 2, p. 11, 2016, doi: 10.3390/jimaging2020011.
- [70] O. Motato and H. Loaiza, "Identificación biométrica utilizando imágenes infrarrojas de la red vascular de la cara dorsal de la mano," *Ing. e Investig.*, vol. 29, no. 1, pp. 90–100, 2009, Accessed: Mar. 10, 2017. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64329113#>.
- [71] K. Estupinan Roldan, M. A. Ortega Piedrahita, and H. D. Benitez, "Design and implementation of a protocol for acquisition and processing of infrared images obtained from hands," *Symp. Signals, Images Artif. Vis. - 2013, STSIVA 2013*, pp. 1–7, 2013, doi: 10.1109/STSIVA.2013.6644944.
- [72] W. M. Liu, K. Chang, S. Yoon, and A. M. Gorbach, "Reconstruction of Thermal Signals in Infrared Images Reveals Temperature Perturbations during Full Forearm Occlusion," *QIRT 2014 Conf.*, 2014, doi: 10.21611/qirt.2014.135.
- [73] R. Gonzalez-Leal, M. Kurban, F. J. Gonzalez, and O. Cruz, "Quantitative human interpretation for breast thermography," in *15th Quantitative InfraRed Thermography Conference*, 2020, pp. 1–5, doi: 10.21611/qirt.2020.078.
- [74] S. Guerrero, H. Loaiza, and A. D. Restrepo, "Segmentación automática de imágenes térmicas de la mama como apoyo a la detección de cáncer," *Sist. Telemática*, vol. 12, no. 30, pp. 25–34, 2014, Accessed: Mar. 10, 2017. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=411534000002>.
- [75] C. D. Ferrin and H. Loaiza, "A Real-Time Multispectral Computer Vision System for Morpho-Thermal Analysis of Footprint Plantar," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 8, pp. 2680–2686, 2015, Accessed: Mar. 10, 2017. [Online]. Available: http://ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol13/vol13issue08Aug2015/13TLA8_32Ferrin.pdf.
- [76] J. Roche and D. Balageas, "Advanced thermal imaging techniques for quantitative damage mapping of composite materials," in *6th International Symposium on NDT in Aerospace*, 2014, no. November, pp. 12–17.
- [77] C. Rongier, R. Gilblas, Y. Le Maoult, L. Redjem-Saad, and F. Schmidt, "Infrared thermography applied to the validation of thermal simulation of highluminance LED used in automotive front lighting," in *15th Quantitative InfraRed Thermography Conference*, 2020, pp. 1–2, doi: 10.21611/qirt.2020.002.
- [78] Y. Kawai, M. Ishikawa, H. Nishino, H. Ishigaki, and K. Ogawa, "Estimation of remaining water in steel pipes using active thermography," in *15th Quantitative InfraRed Thermography Conference*, 2020, pp. 1–6, doi: 10.21611/qirt.2020.094.
- [79] M. Kopeć and B. Więcek, "AC temperature estimation of power electronic devices using 1D thermal modeling and IR thermography measurements," in *15th Quantitative InfraRed Thermography Conference*, 2020, pp. 1–7, doi: 10.21611/qirt.2020.161.
- [80] R. Usamentiaga, C. Ibarra-Castanedo, and X. Maldague, "More than Fifty Shades of Grey: Quantitative Characterization of Defects and Interpretation Using SNR and CNR," *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 37, no. 2, pp. 1–17, 2018, doi: 10.1007/s10921-018-0479-z.



Jorge H. Erazo Aux. Ingeniero Electrónico (2004), Magister en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Eléctrica y Electrónica (2010) y Doctor en Ingeniería con énfasis en Ingeniería eléctrica y Electrónica (2021) de la Universidad del Valle, Cali – Colombia. Profesor Asociado de la Facultad de Ingeniería de la Institución Universitaria Antonio Camacho, Cali – Colombia. Termógrafo Nivel I (2007) y Nivel II (2011) del Infrared Training Center – ITC. Áreas de interés: Termografía, visión artificial y procesamiento digital de señales.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2692-9654>



Humberto Loaiza Correa. Ingeniero Electricista (1990) y Magister en Automática (1995) de la Universidad del Valle. Doctor en Robótica y Visión Artificial (1999) de L'Université d'Evry, Francia. Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Codirector del Grupo de Investigación en Percepción y Sistemas Inteligentes (PSI). Áreas de interés: robótica móvil, visión artificial y el procesamiento digital de señales.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7206-7333>



Andrés David Restrepo Girón. Ingeniero Electrónico (1999), Magister en Automática (2005) y Doctor en Ingeniería (2014) de la Universidad del Valle. Profesor Asociado de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Áreas de interés: procesamiento digital de señales e imágenes, ultrasonido e instrumentación

inteligente.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7891-1064>