

Procesamiento de imágenes infrarrojas para la detección de defectos en materiales

Infrared Image Processing to Detect Defects in Materials

HERNÁN DARÍO BENÍTEZ RESTREPO

Ingeniero Electrónico de la Pontificia Universidad Javeriana y estudiante del Doctorado en Ingeniería de la Universidad del Valle (Colombia). Integrante del grupo Percepción y Sistemas Inteligentes, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle.

hbenitez@univalle.edu.co

CLEMENTE IBARRA-CASTANEDO

Ph.D, Université Laval. Investigador Posdoctoral de la Université Laval. Département de génie électrique et de génie informatique Université Laval (Canada).

IbarraC@gel.ulaval.ca

ABDEL HAKIM BENDADA

Doctor en Ciencias de la Université de Constantine (Francia). Profesor de la Université Laval, Département de génie électrique et de génie informatique Université Laval (Canada)

bendada@gel.ulaval.ca

XAVIER MALDAGUE

Ph.D, Université Laval. Profesor Département de génie électrique et de génie informatique Université Laval (Canada).

maldagx@gel.ulaval.ca

HUMBERTO LOAIZA

Doctor en Robótica en l'Université d'Evry (France). Profesor e integrante del grupo Percepción y Sistemas Inteligentes, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle.

hloaiza@univalle.edu.co

EDUARDO CAICEDO

Doctor en Informática Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid. Profesor e integrante del grupo Percepción y Sistemas Inteligentes, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle (Colombia)

ecaicedo@univalle.edu.co

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de recepción: 10 de septiembre de 2006

Fecha de aceptación: 30 de abril de 2007

Palabras clave: termografía infrarroja, ensayo no destructivo, procesamiento de imágenes, cuadrupolos térmicos.

Keywords: Infrared thermography, non destructive testing, image processing, thermal quadrupoles.

RESUMEN

El Ensayo Termográfico No Destructivo (ETND) es una técnica de evaluación de materiales, en la que la superficie de una muestra de material es estimulada térmicamente para producir una diferencia de temperatura entre las áreas no defectuosas y las eventualmente defectuosas. Los cambios de temperatura son registrados mediante una cámara infrarroja; posteriormente, dada la distorsión generada por el ruido, se ejecutan etapas de procesamiento para detectar y/o caracterizar los defectos en el material. En este artículo se analizan y comparan experimentalmente varios de estos métodos de procesamiento y se profundiza en la técnica CAD (Contraste Absoluto Diferencial) modificada por cuadrupolos térmicos.

ABSTRACT

Thermographic Non Destructive Testing (TNDT) is a non destructive evaluation technique in which the surface of a material sample is thermally stimulated to produce a temperature difference between non defective areas and, eventually, defective areas. These temperature changes are registered with an infrared camera and processed in several stages, given the signal distortions generated by noise, in order to detect and/or characterize defects inside the material. In this paper, several processing techniques are analyzed and compared using experimental data and the technique DAC (Differential Absolute Contrast), modified with Thermal Cuadrupoles.

* * *

1. Introducción

La Evaluación No Destructiva de Materiales (END) se puede llevarse a cabo mediante distintas técnicas. Si la muestra que se va a inspeccionar es sometida a una excitación específica, se trata de END activa. Se pueden emplear ultrasonidos, corrientes de Eddy o rayos X, entre otros. En [1] se menciona que estas técnicas permiten detectar anomalías, descubrir defectos térmicamente no conductores como fisuras y delaminaciones, y detectar la presencia de objetos extraños sin afectar la integridad física del objeto bajo inspección ni su uso futuro.

El Ensayo Termográfico No Destructivo (ETND) es una técnica de END de materiales en la cual la superficie de una muestra de material es estimulada térmicamente para producir una diferencia de temperatura entre las áreas no defectuosas y defectuosas del material. Esta aproximación es llamada *termografía activa* y también se clasifica según el tipo de fuente de calor usada para estimular la muestra (pulsos, ondas periódicas, etc.). Cuando la estimulación térmica es de corta duración o pulso se

denomina *termografía activa pulsada*; esto último caso se estudiará en el presente artículo.

La termografía activa se ha convertido en un método poderoso para la detección de defectos en varios tipos de materiales, desde compuestos hasta metales [2]. En [3] el ETND se compara con otras técnicas tradicionalmente usadas, como rayos X o ultrasonidos, y se le atribuyen ventajas como la inspección rápida y sin contacto físico; esto contrasta con el caso de los ultrasonidos, que requieren de contacto y, en general, de tiempos largos de inspección. Además, la ETND es segura debido a que no utiliza las radiaciones dañinas propias de los rayos X. Como desventaja vale señalar que las lámparas fotográficas de alta potencia usadas comúnmente como fuentes de calor hacen necesario el uso de protección visual durante el experimento; asimismo, el ETND tiene limitaciones como es la dificultad para lograr un calentamiento uniforme en un periodo corto de tiempo sobre un área grande por inspeccionar, las pérdidas térmicas por convección o radiación, la capacidad para detectar sólo defectos que resulten

de un cambio medible de las propiedades térmicas del material inspeccionado, y la degradación de la imagen debido a la presencia de ruido multiplicativo y aditivo, como se estudia en [4-6].

A pesar de las limitaciones citadas, en los últimos años se han desarrollado distintas técnicas para procesar y analizar imágenes infrarrojas que permitan la detección y caracterización de defectos en materiales. El propósito de este artículo es analizar varias de estas técnicas y comparar sus resultados en términos de la detección de defectos. En los apartados 2 y 3 se describen una configuración típica para la adquisición de datos en termografía activa pulsada y las técnicas por analizar, a saber: termografía de fase pulsada, reconstrucción de señales termográficas, termografía de componentes principales, redes neuronales y contraste térmico. En el apartado 4 cada una de estas técnicas se aplica a la inspección de una muestra de *Plástico Reforzado de Fibra de Carbono* (PRFC), y se analizan y se discuten los resultados experimentales obtenidos.

2. Adquisición de datos

La configuración experimental necesaria para inspeccionar con termografía activa se muestra en la figura 1. La estimulación térmica, puede llevarse a cabo en modo reflexión (cuando la cámara infrarroja y la fuente de calor se encuentran en la misma cara de la muestra) o por transmisión (cuando la cámara infrarroja y la fuente de calor están en caras opuestas de la muestra). El modo de reflexión se usa para la detección y caracterización de defectos relativamente cercanos a la superficie y el modo transmisión para defectos más profundos.

Cuando la muestra ha sido estimulada térmicamente, el calor se propaga a través de ella; luego, cuando el frente de calor encuentra un defecto, la tasa de difusión del calor se modifica de tal forma que cuando se observa la temperatura sobre la superficie surge un diferencial térmico entre el defecto y el área que lo rodea. La cámara infrarroja registra el enfriamiento de la superficie de la muestra; esta información es almacenada en un conjunto de

imágenes infrarrojas que luego son usadas para el análisis.

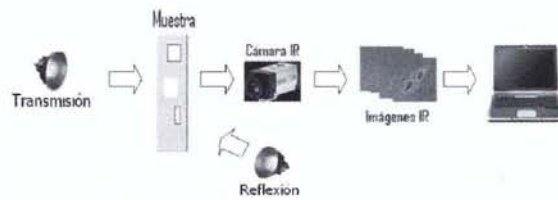


Figura 1. Configuración experimental para la termografía activa pulsada

Las imágenes adquiridas pasan a la etapa de preprocesamiento en la que se eliminan fenómenos como píxeles defectuosos, patrones fijos de ruido y efecto de viñeteo. Este último consiste en una reducción de la intensidad en los bordes de la imagen que es causada por una apertura limitada de los lentes de la cámara; en esta etapa también se convierten los niveles de gris de los píxeles en valores de temperatura. En este artículo se asume que la etapa de preprocesamiento –explicada en [7] y [8] ya ha sido ejecutada– y se procede al procesamiento.

3. Técnicas de procesamiento de imágenes infrarrojas

3.1 Termografía de fase pulsada

La idea fundamental del procesamiento de imágenes infrarrojas mediante la Termografía de Fase Pulsada (PPT, del inglés *Pulsed Phase Thermography*) es extraer y analizar en el dominio de frecuencia la respuesta térmica de la muestra inspeccionada, según se explica en [9].

La extracción de las frecuencias es llevada a cabo con una transformada de Fourier unidimensional sobre cada píxel de la secuencia de termogramas (figura 2):

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) e^{-j2\pi k n / N} = \text{Re}_n + \text{Im}_n \quad (1)$$

En (1), n representa los incrementos de frecuencia ($n= 0,1,\dots,N$); Δt es el intervalo de tiempo entre

adquisiciones; Re_n y Im_n son las partes real e imaginaria de la transformada de Fourier, que pueden combinarse para extraer la amplitud A_n y la fase ϕ_n :

$$A_n = \sqrt{Re_n^2 + Im_n^2}, \quad \phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{Im_n}{Re_n} \right) \quad (2)$$

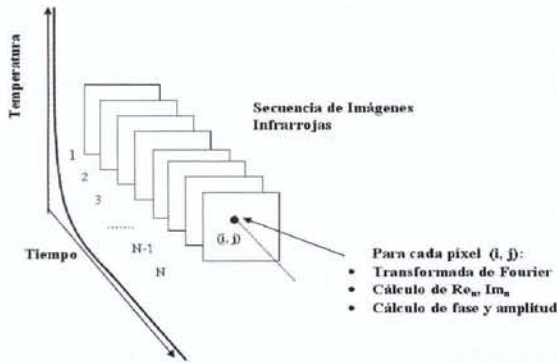


Figura 2. Termografía de fase pulsada (PPT)

La ventaja principal de la termografía de fase pulsada consiste en que es menos afectada que otras técnicas por el calentamiento no uniforme, las variaciones de emisividad y la geometría de la superficie inspeccionada (ver por ejemplo la figura 5b). Adicionalmente, la PPT ha sido probada en una amplia variedad de materiales con geometrías complejas como compuestos: aluminio, Kevlar y Plexiglas [11]. La PPT también cuenta con propiedades cuantitativas [10], lo que permite estimar la profundidad z de un defecto mediante la frecuencia límite f_b , que es la frecuencia en la cual el contraste de fase es lo suficientemente alto para que un defecto sea detectado.

La profundidad z y la frecuencia límite f_b se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$z = C_1 \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot f_b}} \quad (3)$$

En (3), α es la difusividad térmica y C_1 es la constante de regresión, igual a uno cuando se trabaja con

imágenes de amplitud, y aproximadamente igual a 1,8 en el caso de la fase.

Una de las desventajas de la PPT es que para obtener una inspección cualitativa o cuantitativa se debe enfrentar un compromiso entre la tasa de muestreo, la longitud de la ventana de truncamiento y la capacidad computacional disponible. Adicionalmente, el operador debe definir un área no defectuosa en forma a priori y subjetiva, con el fin de encontrar la f_b . Esta intervención humana impide que esta técnica pueda ser completamente automatizada.

En la actualidad, se adelantan investigaciones orientadas a determinar el grosor del defecto a través de la termografía de fase pulsada.

3.2 Reconstrucción de señales termográficas

La reconstrucción de señales termográficas (TSR del inglés *Thermographic Signal Reconstruction*) es una técnica de procesamiento de imágenes termográficas basada en la ecuación unidimensional de difusión de calor que describe la evolución de temperatura sobre la superficie de una placa semi-infinita, después de haber recibido un estímulo térmico tipo Delta de Dirac:

$$T = \frac{Q}{b\sqrt{\pi t}} \quad (4)$$

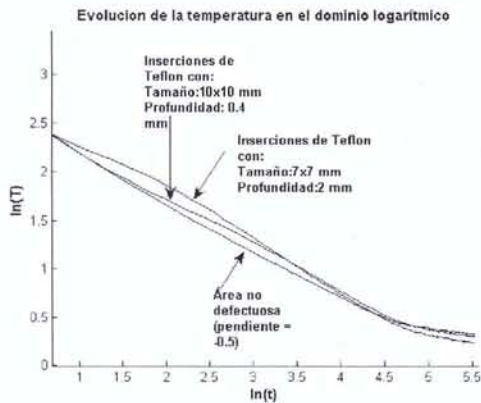
En (4): t es el tiempo, e la efusividad térmica del material y Q la densidad de energía sobre la superficie. Esta relación puede ser escrita en forma logarítmica, de tal manera que la evolución temporal de temperatura de cada píxel pueda ser aproximada con un polinomio de la siguiente manera:

$$\ln[T(t)] = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 \ln^2(t) + \dots + a_n \ln^n(t) \quad (5)$$

En (5), $n + 1$ es el grado del polinomio. Las principales ventajas de la TSR son:

- La entrega de buenos resultados cualitativos (ver por ejemplo las figuras 5e y 5f) que permiten la detección de defectos.

- El filtrado de ruido de alta frecuencia.
- La reducción de datos por procesar, ya que la secuencia entera de imágenes termográficas puede ser reconstruida a partir de los coeficientes del polinomio usado para la regresión, el cual, por lo general, es de orden bajo (4 a 7, dependiendo del contenido de ruido de la señal). Así, una secuencia de 800 imágenes puede ser comprimida a cinco, si se aplica la TSR con un polinomio de grado 4. La TSR también puede usarse para determinar la profundidad a la que se encuentra un defecto, ya que los comportamientos logarítmicos de los píxeles que corresponden a un área defectuosa se alejan del comportamiento lineal (con pendiente $-0,5$) en un instante de tiempo determinado correlacionado con la profundidad del defecto (gráfica 1).



Gráfica 1. Evolución de temperatura en el dominio logarítmico en una muestra de compuesto (PRFC) con inserciones de Teflon® a diferentes profundidades y con diferentes tamaños

Aunque la TSR genera datos experimentales filtrados es valioso anotar que la primera y segunda derivada de los datos filtrados mejoran el contraste entre las áreas defectuosas y no defectuosas, siendo menos sensibles a los efectos del calentamiento no uniforme (figuras 5e y 5f); además, son útiles para cuantificar la profundidad de defectos [12]. Entre las limitaciones de TSR se tiene que se debe optimizar el grado del polinomio por usar para el ajuste. Además, si el ajuste no es adecuado se puede inducir ruido en las imágenes procesadas.

3.3 Termografía de componentes principales

La termografía de componentes principales (PCT, del inglés *Principal Components Thermography*) ha sido usada para procesar secuencias de imágenes IR, extraer características y reducir la redundancia de datos descomponiendo la temperatura que varía en el tiempo (*descomposición en valores propios*) y proyectándola en funciones más apropiadas que las oscilatorias empleadas en la PPT, que se ajustan mejor a la naturaleza monótonicamente decreciente de las señales producidas a partir del ETND [13].

Antes de aplicar la descomposición a la matriz 3D, que representa la secuencia de imágenes IR, se debe transformar en una matriz 2D. De esta forma, la SVD (*Singular Values Decomposition*) de la matriz A de $M \times N$ elementos ($M > N$), en donde N es el número de imágenes y M es el número de píxeles por cada imagen, está dada por la relación:

$$A = U \cdot R \cdot V^T \quad (6)$$

En (6), R es una matriz diagonal de dimensiones $N \times N$ (valores singulares de A presentes en la diagonal), U es una matriz $M \times N$ (*características espaciales*) y V^T es la traspuesta de la matriz de $N \times N$ elementos (*característica temporal*).

Las columnas de U representan el conjunto de modos ortogonales estadísticos conocidos como *funciones ortogonales empíricas* (del inglés *Empirical Orthogonal Functions*), que describen las variaciones espaciales. Por otra parte, los componentes principales PC (del inglés *Principal Components*) representan las variaciones temporales que se encuentran distribuidas en el sentido de las columnas de la matriz V^T . La principal ventaja de la TCP consiste en su capacidad para mejorar el contraste de los defectos (ver figura 5d) y estimar su profundidad. Además, con un único proceso computacional se produce una imagen que contiene contrastes espaciales relacionados con la estructura subyacente de los defectos y una evolución temporal que provee una base para estimar la profundidad de defectos. La desventaja de la TCP radica en que es un proceso costoso desde el punto de vista com-

putacional y requiere más esfuerzo computacional que otras técnicas.

3.4. Redes neuronales artificiales

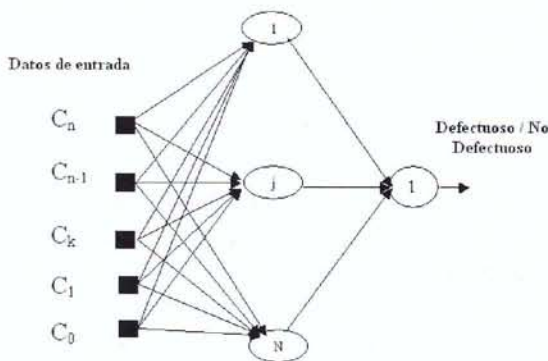
Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son conocidas por su capacidad para realizar mapeos entre conjuntos de variables, su baja sensibilidad al ruido y sus capacidades de aprendizaje y generalización. En los últimos años han sido empleadas como detectores de defectos y estimadores de parámetros de defectos en el ETND. En [14-16] se emplearon arquitecturas *Perceptrón Multicapa* y *Kohonen* que se utilizaron como entradas para estas redes:

- Curvas de evolución del contraste térmico con respecto al tiempo.
- Curvas de temperatura.
- El valor de las derivadas de las curvas de temperatura.
- Máximo del contraste térmico e instante de tiempo en que éste se presenta para cada píxel.
- Curvas de fase y amplitud extraídas a partir de la PPT.

- Recientemente, en [17] se usaron coeficientes extraídos a partir de la TSR. La desventaja del uso de las RNA en el ETND es que una vez la red neuronal ha sido entrenada para un tipo de material y sistema de adquisición, ésta sólo puede ser empleada para el mismo tipo de material y sistema. Además, se necesita al menos una muestra con un conjunto conocido de defectos para extraer la información necesaria para el entrenamiento.

La figura 3a corresponde a una configuración *detector de defectos*; en su salida existe una neurona que decide si el píxel analizado es o no defectuoso, dependiendo de un umbral. Por su parte, la figura 3b corresponde a una *configuración estimadora de profundidad*; en ella la red es usada para mapear entre el espacio de entrada (definido por alguno de los tipos de datos antes mencionados) y la profundidad de los defectos encontrados. Si se encuentra una zona no defectuosa ésta se codifica como profundidad cero. En general, estas dos configuraciones se usan en conjunto; inicialmente, todos los píxeles son analizados por la configuración detector; luego, a la configuración estimadora sólo se presentan aquellos píxeles clasificados como defectuosos por parte del detector.

a)



b)

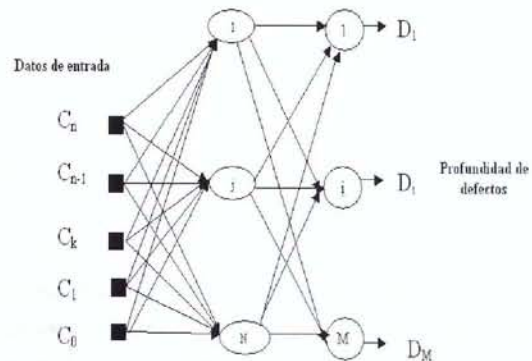


Figura 3. Configuraciones: a) detectora; b) estimadora de defectos, con RNA

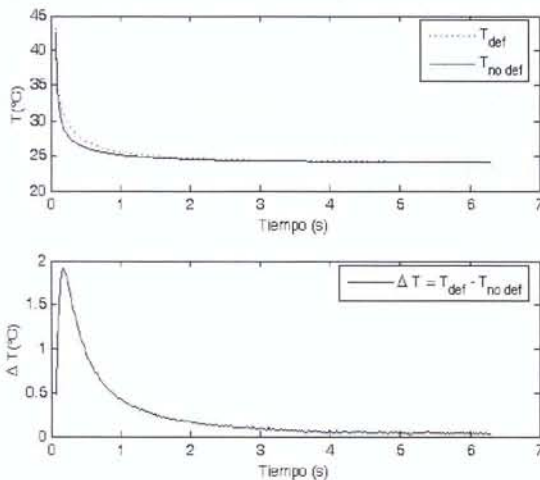
3.5 Métodos de procesamiento con contraste térmico

3.5.1 Contraste térmico clásico

En el ETND el contraste térmico se usa para evaluar la visibilidad de un defecto, mejorar la calidad de la imagen y determinar la profundidad, grosor y tamaño de los defectos de un material. En su modo más simple éste último puede definirse como la diferencia entre la temperatura en una zona no defectuosa T_{no_def} y una región defectuosa T_{def}

$$C^a(t) = \Delta T(t) = T_{def}(t) - T_{no_def}(t) \quad (7)$$

Este tipo de contraste es llamado de tipo *absoluto*. En la gráfica 5 se observan las curvas de temperatura para un punto sin defecto y otro con defecto, y su contraste térmico absoluto.



Gráfica 2. Curvas de temperatura y contraste térmico entre un área defectuosa y un área no defectuosa

En [18] se describen otros tipos de contraste: relativo, normalizado y estándar; todos ellos requieren del uso de la temperatura de un área sobre la muestra del material definida como no defectuosa. La definición de esta área es un asunto crítico; en un sentido amplio, su localización no se define con precisión,

dado que no se conoce con anterioridad dónde están ubicados los defectos, si ellos existen.

3.5.2 Contraste absoluto diferencial (CAD)

En [19] el CAD desarrollado se propone para calcular la temperatura de un área no defectuosa a través de la solución unidimensional de la ecuación de Fourier para materiales homogéneos y semi-infinitos estimulados con un impulso térmico Delta de Dirac, expresada en la siguiente ecuación:

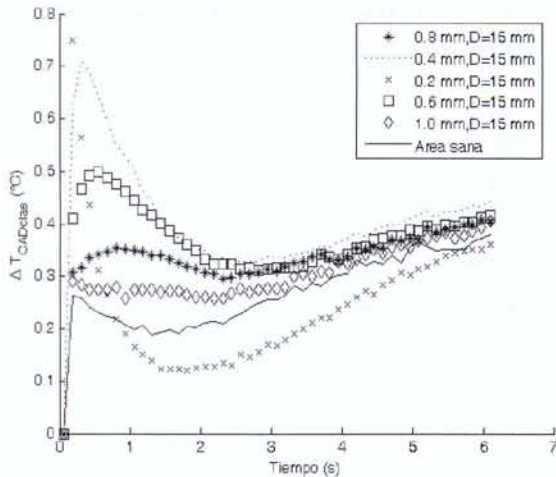
$$T(t) = T_0 + \frac{Q}{b\sqrt{\pi t}} \quad (8)$$

En (8), T_0 es la temperatura inicial de la placa, Q es la energía por unidad de área depositada sobre la placa y b es la efusividad térmica del material. Combinando (7) y (8) se llega a la siguiente expresión:

$$\Delta T_{CAD} = T_{def} - \sqrt{\frac{t'}{t}} \cdot T(t') \quad (9)$$

En (9): t' es el tiempo transcurrido entre el instante en el cual el impulso Dirac de calor llega a la muestra y el instante en que se observa por primera vez un defecto en el experimento. En [20] se propone un método que automatiza la búsqueda de t' .

Dado que el método CAD está basado en un modelo 1D para placa semi-infinita, es decir, no se tiene en cuenta el espesor de la placa, el error en los resultados obtenidos aumenta para tiempos largos (al final de la secuencia), cuando el frente de calor alcanza el lado opuesto de la placa. Este efecto puede apreciarse en la gráfica 3 que muestra las curvas de contraste correspondientes a cinco insertos cuadrados de Teflón® de 15 mm de lado, entre 0,2 y 1,0 mm de profundidad; en lugar de decrecer gradualmente, el contraste aumenta en tiempos largos.



Gráfica 3. Curvas de CAD clásico de los defectos de 15 mm de diámetro en la muestra PRFC006

5.5.3 CAD modificado por cuadrupolos térmicos

El CAD modificado por cuadrupolos térmicos es un nuevo tipo de contraste cuyo modelo de área no defectuosa es más apropiado que el usado en el CAD clásico. Esta nueva técnica está basada en cuadrupolos térmicos, que están definidos como un método empleado para resolver problemas de transferencia de calor con base en la transformada de Laplace [21]. El método transforma las ecuaciones diferenciales desde el dominio espacio-tiempo hasta el dominio de Laplace, en el que se puede tener una representación simple y explícita del problema tratado. Después de aplicar esta transformada, el problema puede ser resuelto en el dominio de Laplace y luego ser transformado de vuelta al espacio original por transformada inversa, mediante el algoritmo reportado en [22].

Este método es usado para la solución de los problemas directo (cálculo de la respuesta térmica de un sistema) e inverso (determinación de parámetros del sistema con base en la respuesta térmica). Sin embargo, su base analítica lo restringe a problemas lineales con geometrías simples. Si se aprovechan estas características se hace un estudio de una placa finita que recibe un impulso de calor Delta de Dirac; se quiere conocer la temperatura sobre la cara que recibe este impulso.

La figura 4 muestra una placa de material compuesto con espesor L (m) que es sometida a un impulso de calor Delta de Dirac Q (J/m^2) depositado sobre su cara superior ($x = 0$), mientras su cara inferior ($x = L$) permanece térmicamente aislada.

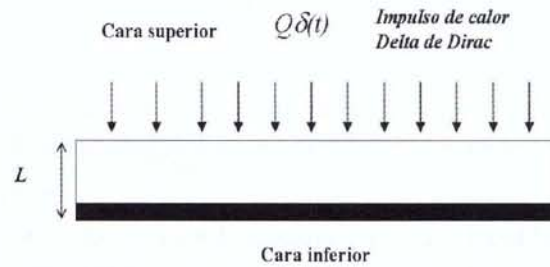


Figura 4. Placa finita de material compuesto sometida a un impulso térmico delta de Dirac

Mediante la técnica de cuadrupolos térmicos descrita en [23] es posible encontrar la temperatura de la cara superior de este sistema en el dominio de Laplace:

$$\theta_{sup}(p) = \frac{Q}{b} \frac{1}{\sqrt{p}} \coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}} \quad (10)$$

En (10), $\theta_{sup}(p)$ es la temperatura en el dominio de Laplace en la cara superior de la placa, p es la variable del dominio de Laplace, Q es la densidad total de energía entregada por el impulso de Dirac, L es el espesor de la muestra, α es la difusividad térmica del material y b es la efusividad térmica del material. En [24] y [25] se propone que las distribuciones de temperatura en la cara superior para los tiempos t y t' se pueden expresar de la siguiente manera:

$$T_{no_def}(t) = \frac{Q}{b} L^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{p}} \coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}} \right]_t \quad (11)$$

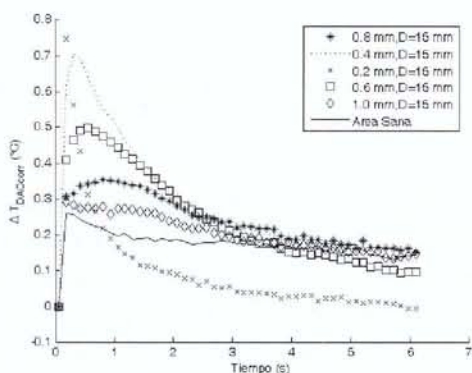
$$T_{no_def}(t') = \frac{Q}{b} L^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{p}} \coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}} \right]_{t'} \quad (12)$$

Combinando (11) y (12) se obtiene la siguiente expresión para el CAD modificado:

$$\Delta T_{CAD_{CORR}} = T(t) - \frac{L^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{p}} \coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}} \right]_t}{L^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{p}} \coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}} \right]_{t'}} T(t') \quad (13)$$

Es importante observar que esta última ecuación incluye explícitamente el espesor L de la muestra.

En la gráfica 4 se observan las curvas del CAD modificado para los mismos defectos analizados en el apartado 3.5.2. En este caso su desempeño se mantiene para tiempos largos, es decir, que para el final de la secuencia el contraste desciende casi a cero. Esto representa una mejora significativa con respecto al método anterior, al constituir un modelo más apropiado para representar la difusión de calor a través de la muestra.

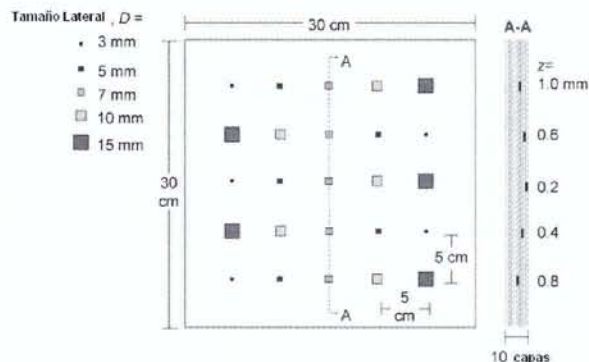


Gráfica 4. Curvas de CAD modificado de los defectos de 15 mm de diámetro en la muestra PRFC006

4. Resultados experimentales comparativos y análisis

Con el fin de observar los resultados de aplicación de las técnicas antes citadas se efectuó un experimento con una muestra de material compuesto PRFC (*Plástico Reforzado con Fibra de Carbono*) que contiene varias inserciones de Teflon® de distintos tamaños y profundidades; este último es usado para simular delaminaciones en la muestra.

El PRFC es usado ampliamente en aeronáutica, especialmente en la construcción de alas y fuselaje de aviones [26]. La configuración de esta muestra es descrita en la gráfica 5.



Gráfica 5. Configuración de muestra plana de PRFC (PRFC006) con inserciones de Teflon®

Para la toma de las imágenes se empleó una cámara infrarroja Santa Barbara Focal Plane SBF 125 con una frecuencia de muestreo de 157,8 Hz y un tiempo de adquisición de 6,23 s. Para este experimento se usó como fuente de calor un flash Balcar FX 60, que entrega una potencia de 6,2 KJ en 5 ms.

En la figura 5 se resumen los resultados obtenidos. En 5a se muestra el termograma tomado a los 1,8s del experimento; allí se hacen visibles varios de los defectos afectados por una fuerte influencia del calentamiento no uniforme, la cual es provocada por usar un solo *flash* como fuente de estimulación térmica. En 5b se muestra el fasegrama correspondiente a la frecuencia 0,47 Hz, haciéndose evidente la mayor parte de los defectos, excepto el más profundo y de menor diámetro ubicado en la parte superior izquierda; el calentamiento no afecta de manera considerable los resultados de este tipo de procesamiento.

En 5c y 5d se representan las dos primeras funciones ortogonales empíricas (EOF del inglés *Empirical Orthogonal Functions*) que fueron obtenidas a partir de la termografía de componentes principales. En la EOF1 dejan de observarse varios defectos y la función es afectada por el calentamiento no

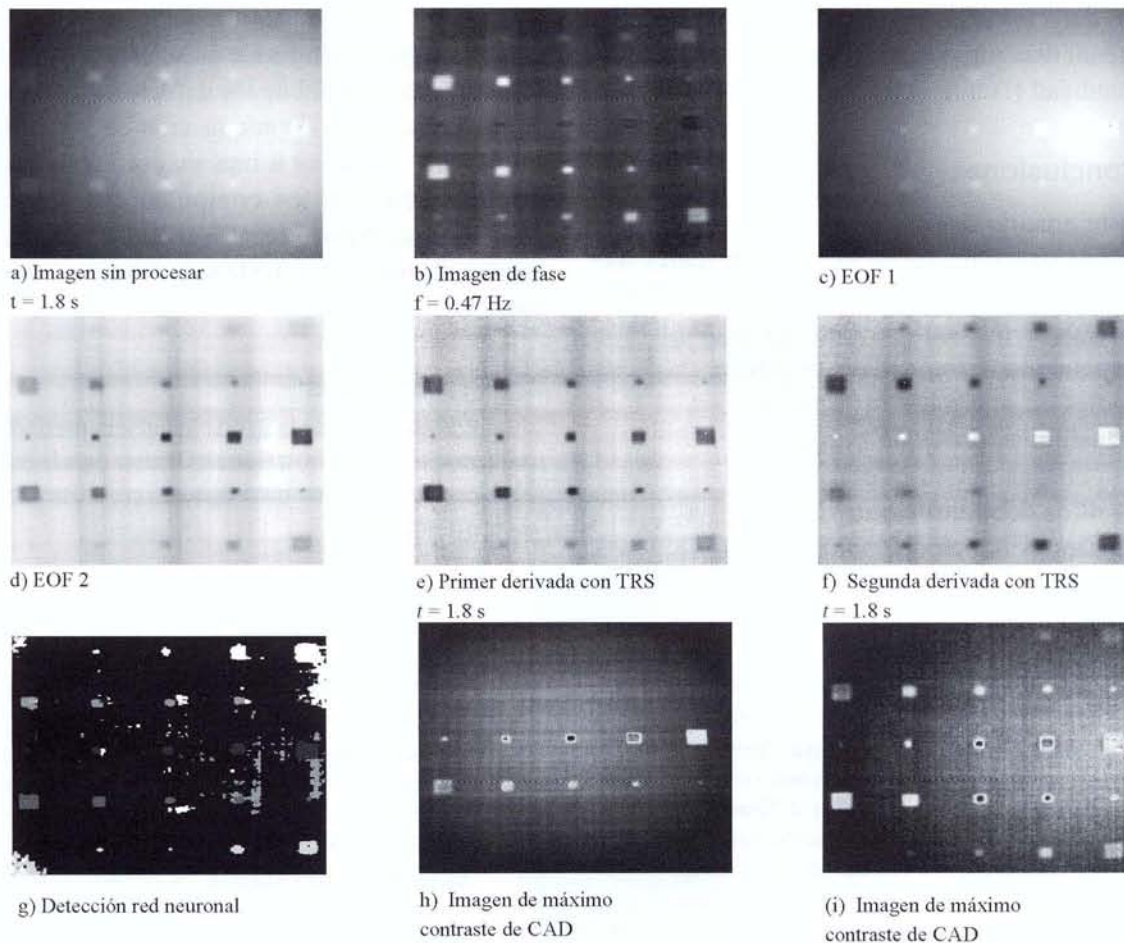


Figura 10. Resultados de distintas técnicas de procesamiento aplicadas a la muestra de PRFC

uniforme; en la EOF2 se observan la mayor parte de los defectos y la función no es afectada por el calentamiento no uniforme; sólo se analizan estas dos primeras funciones, dado que las otras son fuertemente afectadas por el ruido. Las figuras 5e y 5f provienen de aplicar la TSR y de obtener imágenes de primera y segunda derivada en el tiempo 1,8 s con un polinomio de grado 6. En la imagen de primera derivada los defectos más profundos (primera fila de defectos) no son visibles, mientras que en la de segunda derivada se observan prácticamente todos los defectos, exceptuando el más profundo y de menor diámetro y aquellos con 0,4 mm de profundidad de 3 y 5 mm de diámetro.

En la figura 5g se observa el resultado de aplicar una RNA con 60 neuronas en su capa oculta, la cual es entrenada con aprendizaje bayesiano y con coeficientes polinomiales como datos de entrada, extraídos a partir de la aplicación de la TSR. Se observa que existen varias falsas detecciones, especialmente alrededor de los defectos de mayor profundidad (1mm y 0,8 mm), menor tamaño (3 mm de diámetro), que están localizados en la zona derecha o de calentamiento no uniforme. Por último, las figuras 5h y 5i representan las imágenes de máximo contraste obtenidas después de aplicar el CAD y el CAD modificado. Mediante el CAD clásico sólo se detectan los defectos menos profundos (0,2 mm),

mientras que con el CAD modificado la mayor parte de los defectos se hacen visibles, excepto aquellos de menor diámetro (7 mm, 5 mm y 3 mm) y mayor profundidad (1mm).

5. Conclusiones

En este artículo se describieron y se compararon experimentalmente varias de las principales técnicas usadas para el procesamiento de datos en el ETND; éstas mejoran los alcances del ETND, al incrementar la visibilidad de los posibles defectos presentes en una muestra. Cada técnica se basa en transformaciones que buscan llevar los datos que se encuentran en el dominio espacio-tiempo hacia otros dominios como el frecuencial (PPT), Laplaciano (CAD modificado), logarítmico (TSR),

funciones ortonormales (PCT) o espacio de parámetros (RNA), en los cuales los efectos del ruido y del calentamiento no uniforme no sean tan fuertes que afecten la visibilidad de los defectos. Las mejoras en las capacidades de adquisición de las cámaras infrarrojas, sumadas a una mayor capacidad de procesamiento de los computadores, permiten que estas técnicas puedan ser implementadas y que los alcances del ETND sean llevados a nuevos límites.

Agradecimientos

Los autores reconocen la ayuda financiera prestada por Colciencias (Colombia) a Hernán Benítez para la realización de una pasantía de investigación en la Universidad Laval en Canadá.

Referencias bibliográficas

- [1] Shull, P. (2002). *Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques and Applications*. USA, Marcel Dekker.
- [2] Krapez, J. C. (2001). "Thermal Contrasts in Pulsed Infrared Thermography". *Nondestructive Testing Handbook*, Vol. 3, Infrared and Thermal Testing X. Maldague & Patrick O. Moore Ed. American Society for Nondestructive Testing, pp. 411-439.
- [3] Maldague, X. (2002). "Introduction to NDT by Active Infrared Thermography". *Materials Evaluation*, Vol. 6 (9), pp. 1060-1073.
- [4] Vavilov, V., Bison, P.G, Bressan, C., Grinzato, E., Marinetti, S. (August 17-20 1993). "Informative Parameters and Noise in Transient Thermal NDT". *Proceedings on Advances in Signal Processing for Nondestructive Evaluation of Materials*, Québec City, Québec, Canada, pp. 193-209.
- [5] Grinzato, E. G., Vavilov, V.P, Bison, P. G., Marinetti, S., Bressan, C. (1995). "Methodology of Processing Experimental Data in Transient Thermal Nondestructive Testing (NDT)". *Proc SPIE*, Vol. 2473, Thermosense XVII, Sharon A. Semanovich; Ed., pp 167-178.
- [6] Zalameda, J. N., Rajic, N., Genest, M. (2006). "Signal to Noise Studies on Thermographic Data with Fabricated Defects for Defense Structures". *Proc. SPIE*, Vol. 6205, Thermosense XXVIII; Jonathan J. Miles, G. Raymond Peacock, Kathryn M. Knettel; Eds.
- [7] Marinetti, S., Maldague, X., Pristay, M. (1997). "Technical Paper: Calibration Procedure for Focal Plane Array Cameras and Noise Equivalent Material Loss for Quantitative Thermographic NDT". *Materials Evaluation*, pp 407-412.
- [8] Ibarra-Castanedo, C., González, D., Klein, M., Pilla, M., Vallerand, S., Maldague X. (2004). "Infrared Image Processing and Data Analysis". *Infrared Physics and Technology*, Vol. 46 (1-2), pp 7583.
- [9] Maldague, X. and Marinetti, S. (1996). "Pulse Phase Infrared Thermography". *Journal of Applied Physics*, Vol. 79 (5), pp. 2694-2698.
- [10] Ibarra-Castanedo C., Maldague, X. (2004). "Pulsed Phase Thermography Reviewed". *Journal of Quantitative Infrared Thermography*, Vol. 1 (1), pp 47 -70.
- [11] Ibarra-Castanedo, C., Avdelidis, N. P, Grinzato, E. G, Bison, P. G, Marinetti, S., Liu C., Genest M. and Maldague, X. (2006). "Quantitative Inspection of Non-Planar Composite Specimens by Pulsed Phase Thermography". *QIRT Journal*, Vol. 3 (1), pp. 25-40.
- [12] Shepard, S., Hou, Y., Ahmed, T., Lhota, J. (2006). "Reference-free Analysis of Flash Thermography Data". *Thermosense XXVIII Proc. SPIE*, Vol. 6205, 352-358; Editor Miles J, Peacock.R, Knettel K.
- [13] Rajic, N. (2002). "Principal Component Thermography for Flaw Contrast Enhancement and Flaw Depth Characterization in Composite Structures". *Composites and Structures*, Vol. 58, pp. 521-528.
- [14] Trétout, H., David, D., Marin, J. Y., Dissenter, M., Court, M., Avenas-Payan. (1995). "An Evaluation of Artificial Neural Networks Applied to Infrared

- Thermograph Inspection of Composite Aerospace Structures". *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 14A, Editor D.O Thompson and D.E Chimenti, pp. 827-834.
- [15] Vallerand, S., Maldague, X. (2000). "Defect Characterization in Pulsed Thermography: a Statistical Method Compared with Kohonen and Perceptron Neural Networks". *NDT & E International*, Vol. 33, pp. 307-315.
- [16] Darabi, A. and Maldague, X. (2002). "Neural Network Based Defect Detection and Depth Estimation in TNDE". *NDT&E International*, Vol. 35 (3), pp. 165-175.
- [17] Benítez, H., Ibarra-Castanedo, C., Loaiza, H., Caicedo, E., Bendada, A., Maldague, X. (2006). "Defect Quantification with Thermographic Signal Reconstruction and Artificial Neural Networks". *Proc of 8th Conf on Quantitative Infrared Thermography, Padova, Italy*.
- [18] Maldague, X. (2001). *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. New York, Wiley Interscience, pp. 406-415.
- [19] Pilla, M., Klein, M., Maldague, X. and Salerno A. (2002). "New Absolute Contrast for Pulsed Thermography". *Proceedings of 6th Conference on Quantitative Infrared Thermography*.
- [20] González, D. A., Ibarra-Castanedo, C., Pilla, M., Klein, M., López-Higuera, J. M. y Maldague, X. (2004). "Automatic Interpolated Differentiated Absolute Contrast Algorithm for the Analysis of Pulsed Thermographic Sequence". *Proceedings. 7th Conference on Quantitative Infrared Thermography*, Eds. D. Balageas, G. Busse, G.M. Carlomagno, and J.-M. Buchlin, von Karman Institute, Rhode Saint Genèse, Belgium, pp. H.16.1-H.16.6.
- [21] Maillet, D., A. S., Batsale, J. C., Degiovanni, A. Moyne. (2000). *Thermal Quadrupoles: Solving the Heat Equation through Integral Transforms*. John Wiley and Sons, West Sussex England.
- [22] H. Stehfest (1970). *Remarks on algorithm 368: Numerical inversion of Laplace transforms. Com Association of Computing Machinery*. 13.
- [23] Maillet, D., Batsale J. C., Bendada, A. and Degiovanni, A. (1996). "Integral Methods and Non Destructive Testing Through Stimulated Infrared Thermography". *International Journal of Thermal Sciences*, 35 pp. 14-27.
- [24] Benítez, H., Ibarra-Castanedo, C., Bendada, A., Maldague, X. y Loaiza, H. (2006). "Modified Differential Absolute Contrast Using Thermal Quadrupoles for the Nondestructive Testing of Finite Thickness Specimens by Infrared Thermography". *Proceedings CCECE 2006*.
- [25] Ibarra- Castanedo, C., González, D. A., Benítez, H. D., Bendada, A., Maldague, X. (Septiembre 13-15 de 2006). *Estado del arte en el procesado de señales e imágenes por termografía pulsada, XI Simposio de Tratamiento de Señales, Imágenes y Visión Artificial*, [disponible en CD], Bogotá.
- [26] Guizzo, E. (2006). "Carbon Takeoff". *IEEE Spectrum*, Vol. 43 (1), pp. 24-28.