

Análisis de imágenes en Termografía Infrarroja

Clemente Ibarra Castanedo, *Student Member, IEEE*, Daniel A. González, Hakim Bendada, Xavier Maldague, *Member, IEEE*

Resumen—La Termografía Infrarroja (TI) permiten detectar y medir emisiones electromagnéticas en el espectro infrarrojo. Una de las aplicaciones más interesantes de la TI es la Evaluación No Destructiva (END) ya que pueden inspeccionarse grandes superficies de forma rápida, segura, sin necesidad de contacto y sin interferencia, tras el envío de un impulso de calor. Sin embargo, las imágenes térmicas resultantes, o *termogramas*, contienen altos niveles de ruido en todas sus formas: electrónico, óptico, estructural, térmico, etc. El procesamiento de la señal infrarroja es entonces una etapa crucial. En este artículo, presentamos un resumen de los diferentes métodos de procesamiento y análisis de imágenes digitales utilizados en TI, con especial énfasis en las aplicaciones de END.

Palabras Clave—Análisis de Imágenes, Procesado de Señales, Termografía Infrarroja, Evaluación No Destructiva.

I. INTRODUCCION

LA Termografía Infrarroja (TI) hace uso de cámaras para la detección de emisiones térmicas en el espectro infrarrojo. Existe un gran número de aplicaciones muy diversas en donde la TI puede ser aplicada. Éstas pueden dividirse en *pasivas*, es decir, que no requieren el uso de fuentes externas de excitación térmica; o *activas*, que necesitan de una fuente externa de calor para crear un contraste térmico. Destaca entre las últimas la Evaluación No Destructiva (END) que facilita la inspección de materiales o procesos sin perjudicar su funcionamiento futuro [1]. La principal ventaja de la TI, con respecto a otros métodos de END más tradicionales como los rayos-X y los ultrasonidos, es que la TI permite la recuperación de secuencias de mapas térmicos, o *termogramas*, de grandes porciones de la pieza inspeccionada de una forma rápida y segura (es decir, sin perjuicio para el ser humano), sin necesidad de contacto y sin interferencia. Sin embargo, las secuencias resultantes contienen altos niveles de ruido en todas sus formas: electrónico, óptico, estructural, térmico, etc. El procesamiento de imágenes es entonces una etapa crucial.

En este artículo, se proporciona primero un análisis de los aspectos teóricos de la Termografía Infrarroja con especial

énfasis en las aplicaciones en END, seguido de un resumen de los principales métodos de procesamiento de señales infrarrojas.

II. ADQUISICIÓN

La figura 1 ilustra el proceso de adquisición de imágenes por TI y puede resumirse como sigue. Primero, un contraste térmico es producido en la superficie de la muestra bajo inspección ❶. En general, este contraste se produce tras el envío de un frente de calor (es el enfoque adoptado aquí) señalando que la utilización de un frente frío es igualmente válida. Esto puede lograrse sea en régimen transitorio (con un impulso de energía) o en régimen permanente (con el envío de

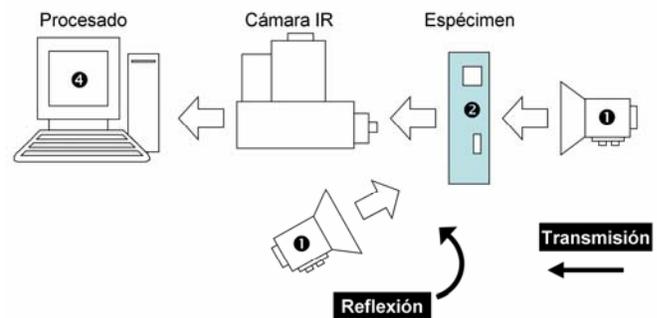


Fig. 1. Sistema de adquisición de imágenes por Termografía Infrarroja.

ondas periódicas), dependiendo de la aplicación [2]. De igual manera, la adquisición de imágenes puede realizarse en *reflexión* (del mismo lado) o en *transmisión* (lado contrario). En general, el modo reflexión es utilizado para defectos internos relativamente cercanos a la superficie, mientras que el modo transmisión lo es para defectos profundos (siempre y cuando se tenga acceso a los dos lados de la pieza). Una vez que el calor entra en contacto con la superficie del espécimen, la energía es transmitida por conducción al interior de la pieza ❷. El principio de detección de defectos se basa en el hecho de que el frente caliente se propaga homogéneamente a través del material salvo en presencia de un cuerpo con propiedades térmicas diferentes (defecto). Cuando el frente hace contacto con este cuerpo, se produce una atenuación o un incremento (dependiendo de las propiedades térmicas del material y del defecto) en la conducción de calor, que tiene una relación directa con el tiempo de propagación del frente. Esto se refleja en la superficie de la muestra por un aumento o disminución de temperatura que indica la presencia de un defecto y que puede ser detectado con la ayuda de una cámara infrarroja ❸.

Existe un gran número de fuentes de degradación de la señal infrarroja, tales como [2]: ruido ligado al equipo de

Los autores desean agradecer al Consejo de Investigaciones en Ciencias Naturales e Ingeniería de Canadá (Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada) por el financiamiento otorgado para esta investigación.

C. Ibarra Castanedo, H. Bendada y X. Maldague son miembros del Laboratorio de Visión y Sistemas Digitales de la Universidad Laval, Quebec, Canadá. GIK 7P4, tel.: +1(418)656-2962; fax: +1(418)656-3594, IbarraC@gel.ulaval.ca, bendada@gel.ulaval.ca, maldagx@gel.ulaval.ca.

adquisición (electrónico); calentamiento no uniforme debido a imperfecciones de la fuente de energía (térmico); diferencias de emisividad e irregularidades en la superficie de la pieza inspeccionada (estructural); reflexiones provenientes de otros objetos; atenuación atmosférica, etc. Así, una vez que las imágenes han sido adquiridas, diferentes técnicas de tratamiento ④ pueden ser utilizadas para realzar el contraste, detectar la presencia de defectos y caracterizarlos. La primera etapa consiste entonces en preprocesar las secuencias tal y como se explica a continuación.

III. PREPROCESADO

A. Regeneración de píxeles defectuosos (*badpixels*)

La primer etapa de preprocesado consiste a regenerar los píxeles defectuosos (*badpixels* o píxeles muertos), esto es, píxeles que presentan niveles anormales de intensidad sean muy bajos o muy altos y que no proporcionan ninguna información de utilidad. Afortunadamente, éstos pueden ser detectados fácilmente con un algoritmo de detección, por ejemplo haciendo pasar un filtro de detección (*kernel*) o simplemente por detección visual por un operador, para después ser remplazados por el valor promedio de su vecindad. El termograma no corregido de la figura 2a corresponde a una placa de acero con tres defectos (con diferentes formas pero ocupando la misma área) 348 ms

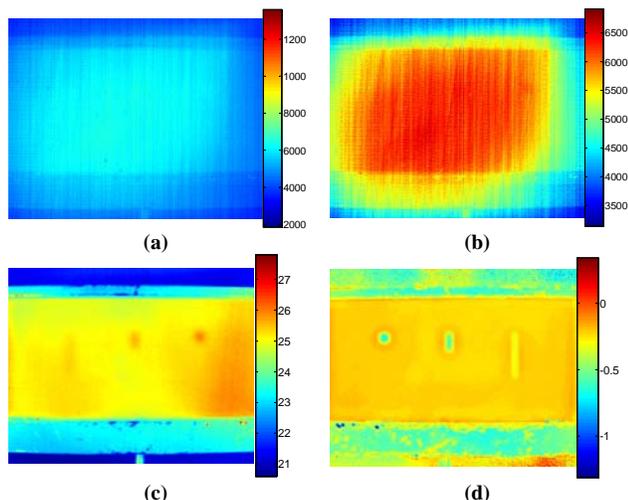


Fig. 2. Termogramas a $t=348$ ms: (a) no corregido; (b) tras restauración de píxeles defectuosos; (c) corrección de viñeteo y del FPN; y (d) fasegrama a $f=1.58$ Hz.

después de haber sido sometida a un impulso de calor de 5 ms y 6.4 J. La figura 2b muestra el resultado después de restaurar los píxeles defectuosos. El viñeteo y el ruido fijo son ahora más evidentes en esta imagen.

B. Corrección de Patrones Fijos de Ruido (FPN)

El siguiente paso es la corrección del patrón de ruido fijo (FPN-*Fixed Pattern Noise*) causado por diferencias en la responsividad de los detectores [2]. La figura 2b muestra el FPN (líneas verticales) en el termograma. Para los casos en que la escena es fija, este problema puede corregirse con la sustracción de una imagen ‘fría’, esto es, el termograma

grabado antes de la aplicación del impulso de calor en la superficie (ver figura 2c). Cabe mencionar que el FPN depende del tipo de configuración utilizada para conformar la matriz de detectores. En general, las cámaras a base de CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) contienen niveles de ruido más altos que sus contrapartes construidas con CCDs (*Charge-Coupled Devices*).

C. Corrección del viñeteo (*vignetting*)

El viñeteo (*vignetting*) es sin duda uno de los problemas más complejos en Termografía. El viñeteo consiste en un oscurecimiento de las esquinas de los termogramas respecto al centro de los mismos debido a una exposición limitada en esas áreas [2] (ver figura 2b). El procedimiento de corrección de viñeteo requiere una etapa de calibración que involucra la toma de termogramas de cuerpo negro a diferentes temperaturas (en el rango de operación) [2].

D. Calibración en temperatura

Las secuencias de datos obtenidos por la cámara consisten en matrices tridimensionales donde cada punto posee dos coordenadas espaciales y una de intensidad arbitraria que necesita de una etapa de calibrado para poder ser transformada en temperatura. Al igual que en el caso de la corrección de viñeteo, la calibración en temperatura requiere la obtención de varias imágenes de intensidad a diferentes temperaturas. Es por ello que, estas dos etapas de tratamiento se realizan simultáneamente. El resultado es un polinomio (de 3^{er} o 4^{to} grado) obtenido por regresión de los datos de temperatura con respecto a los niveles de gris dados por la cámara. La figura 2c muestra el termograma de la figura 2a corregido en píxeles defectuosos, FPN, viñeteo, y transformado en temperatura.

E. Filtrado de señales

La señal puede ser ahora tratada por algoritmos de detección de defectos, segmentación, etc. Para casos en que la señal corregida posee aún altos niveles de ruido, una etapa adicional de filtrado es necesaria. Existe un gran número de técnicas de filtrado que pueden aplicarse a imágenes infrarrojas. Por ejemplo, un filtro gaussiano con varianza $\sigma=2$ ha sido empleado en la figura 5 para mejorar considerablemente el resultado de segmentación. Más detalles en el párrafo V.

IV. PROCESADO

Una vez que la señal infrarroja ha sido preprocesada y transformada en temperatura, es posible realizar ahora un tratamiento de imágenes bien sea para fines de detección de defectos internos o bien para su caracterización (determinación de propiedades térmicas, talla y profundidad). Existen diferentes técnicas que han sido adaptadas especialmente para la Termografía. Los métodos térmicos, descritos a continuación, se encuentran entre los más populares.

A. Métodos de contraste térmico

El contraste térmico en su modo más simple puede definirse

como la diferencia entre la temperatura en una zona libre de defectos o sana T_s , y una región defectuosa T_d [2]:

$$\Delta T(t) = T_d(t) - T_{S_a}(t) \quad (1)$$

La Ec. (1) es el llamado contraste *absoluto* de temperatura y se ilustra en la figura 3. En ocasiones es conveniente utilizar variaciones de esta definición [2]. Sin embargo, todas estas definiciones sufren de un problema común, esto es, la necesidad de localizar una zona sana en la pieza en cuestión.

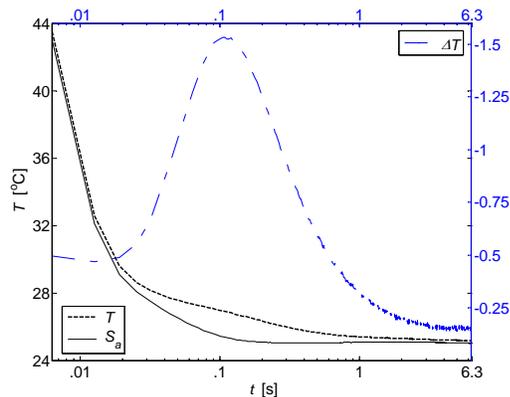


Fig. 3 Curvas de evolución de temperatura para una zona sana (—), de temperatura para una región defectuosa (---), y de contraste térmico (-.-).

En la práctica esto no es siempre posible. Alternativamente, el método de Contraste Absoluto Diferencial (DAC) [4] ha sido desarrollado para solucionar este problema. El método DAC está basado en la solución 1D de la ecuación de difusión de Fourier asumiendo que la superficie de la pieza ha sido sometida a un impulso de Dirac, esto es [3]:

$$T(t) = T_0 + \frac{Q_0}{e\sqrt{\pi t}} \quad (2)$$

Combinando las Ec. (1) y (2), se llega a la siguiente expresión [4]:

$$\Delta T_{dac} = T_d - \sqrt{\frac{t'}{t}} \cdot T(t') \quad (3)$$

donde t es el tiempo actual y t' es definido como el instante en el cual el frente térmico llega a la superficie y que se sabe que se encuentra entre el tiempo de envío del impulso t_0 y el tiempo de aparición del primer defecto t_1 . Más detalles en [4]. En realidad, la evolución de la temperatura en la superficie es un fenómeno 3D complejo, la Ec. (2) es sólo una aproximación del verdadero comportamiento de la temperatura. Por lo tanto, la determinación de t' requiere de un proceso iterativo. Sin embargo, la Ec.(3) ha demostrado ser muy útil para la inspección de materiales homogéneos no sólo como alternativa a los métodos de contraste térmico, que necesitan de la definición de una zona sana, sino también para reducir los efectos de calentamiento no uniforme en la superficie. Además, cabe mencionar que el proceso de determinación de t' ha sido automatizado [5].

B. Termografía de Fase Pulsada (PPT)

La Termografía de Fase Pulsada [6] (PPT- *Pulsed Phase Thermography*) constituye un gran avance en el tratamiento de señal termográfica. La PPT permite pasar del dominio

temporal al espectro frecuencial con la ayuda de la Transformada de Fourier discreta (TFD) [7]:

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) e^{-j2\pi nk/N} = \text{Re}_n + \text{Im}_n \quad (4)$$

donde n corresponde a 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 TFD, que pueden combinarse para extraer la amplitud A_n , y la fase ϕ_n :

$$A_n = \sqrt{\text{Re}_n^2 + \text{Im}_n^2}, \quad \phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}_n}{\text{Re}_n} \right) \quad (5)$$

La fase es particularmente interesante en END ya que es menos afectada por los problemas típicos de la termografía activa como son: reflexiones del entorno, variaciones de emisividad, y calentamiento no uniforme [8]; geometría de la superficie y por su orientación [12]. La figura 2d muestra una imagen de fase, o *fasegrama*, obtenida al aplicar la PPT a la secuencia corregida como en la figura 2c. Como puede observarse, se logra una mejora considerable del contraste entre zonas sanas y defectuosas gracias a la utilización de la fase.

C. Reconstrucción de Señales Termográficas (TSR)

La reconstrucción de imágenes a partir de un polinomio constituye una de las técnicas más interesantes y útiles [9]. La idea es, partiendo de la ecuación de difusión de Fourier - Ec (2) -, que las zonas sanas siguen un comportamiento lineal con una pendiente de $1/2$ en una escala logarítmica, es decir:

$$\ln(\Delta T) = \ln\left(\frac{Q_0}{e}\right) - \frac{1}{2} \ln(\pi t) \quad (4)$$

La evolución de temperatura de un píxel puede ser entonces modelada por un polinomio de la forma:

$$\ln(\Delta T) = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 \ln^2(t) + \dots + a_N \ln^N(t) \quad (5)$$

donde N es el grado del polinomio (en general un polinomio de grado entre 4 y 7 es adecuado dependiendo del nivel de ruido de la señal). La TSR constituye una herramienta muy útil para el filtrado de señales térmicas pero también en la

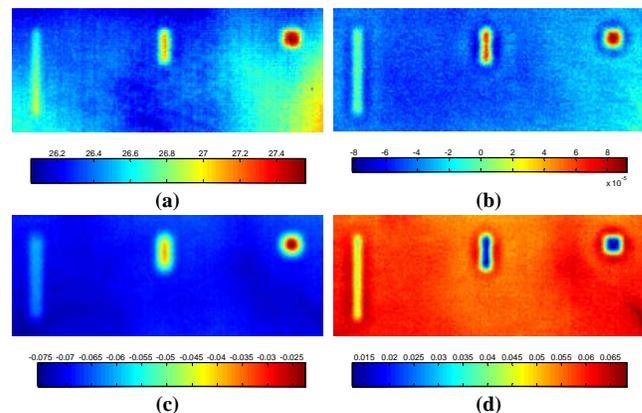


Fig. 4. (a) Termograma a $t=57$ ms; (b) imagen de los coeficientes a_1 en la Ec. (5); (c) imagen de primera derivada temporal a $t=57$ ms; y (d) segunda derivada temporal a $t=57$ ms.

reducción de la cantidad de datos ya que es posible pasar de una secuencia, de 1000 termogramas a tan solo 5 imágenes de los coeficientes de regresión para un polinomio de grado 4.

Por ejemplo, la figura 4b presenta una imagen de los coeficientes a_1 en la Ec. (5), en la que puede constatarse una mejora de contraste.

Otro punto interesante es que la TSR permite fácilmente la reconstrucción de la primera y segunda derivadas temporales. En general, las imágenes de derivadas temporales presentan un mejor contraste y son menos afectadas por el calentamiento no uniforme como puede verse en las figuras 4c y d. Además, puede alcanzarse una mejora de contraste aún más notable al utilizar el algoritmo PPT con datos sintéticos de entrada en vez de datos brutos.

V. ANÁLISIS

A. Modelos térmicos

La utilización de modelos térmicos permite tener una idea sobre la influencia de ciertos parámetros en la detección de defectos sin necesidad de realizar ninguna prueba. Esto ayuda en la planificación de experiencias. Por ejemplo, en la columna izquierda de la figura 5 se muestran termogramas modelados a tres instantes diferentes para analizar el efecto de la difusión sobre defectos de diversas geometrías pero a la misma profundidad (1 mm) y que ocupan el mismo área (25 mm²). A los termogramas reales, en la columna derecha, se les ha substraído una imagen fría para reducir los niveles de

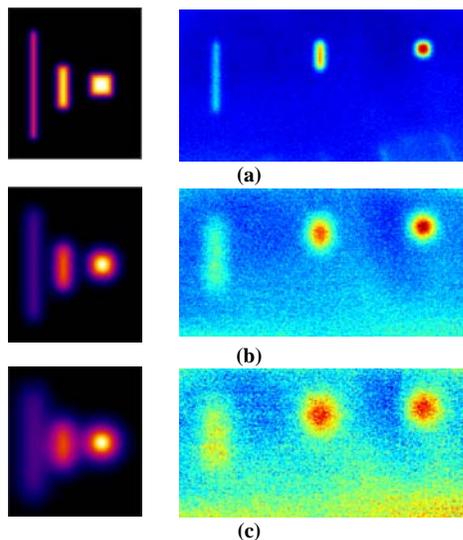


Fig. 5. Resultados de simulaciones (columna izquierda) [1] y termogramas reales con substracción de imagen fría (derecha) para una placa de acero de 2 mm de espesor con tres defectos del mismo área (25 mm²) pero diferente geometría y a tres instantes diferentes: (a) 0.1 s; (b) 0.5 s y (c) 1 s.

ruido. Como puede verse, existe una gran similitud entre las predicciones y los termogramas reales.

B. Detección de defectos

La inspección visual por parte de un operador es la forma más comúnmente adoptada para la detección de defectos. Diferentes organizaciones alrededor del mundo otorgan certificaciones de personal (inspector termográfico nivel I, II y III) [1]. Sin embargo, métodos automatizados pueden ayudar a reducir la subjetividad y en algunos casos eliminar por completo la intervención humana en el proceso de detección.

Existe un gran número de métodos de segmentación propios de procesamiento de imágenes en el espectro visible que pueden perfectamente ser adaptados para el infrarrojo. Por ejemplo, la Fig. 6 muestra el resultado de una segmentación basada en el método de Canny para la detección de bordes. Para la segmentación en la figura 6a se utilizó un fasegrama no filtrado (ver perfil 1D a través de la línea punteada horizontal arriba del fasegrama). El resultado de segmentación es mucho mejor en la figura 6b donde un filtro gaussiano con varianza $\sigma=2$ ha sido utilizado.

C. Determinación del tamaño y la forma de un defecto

Es igualmente posible estimar la forma y el tamaño de un defecto al examinar un termograma o fasegrama, tras la aplicación de un algoritmo de extracción de bordes, *p.ej.*

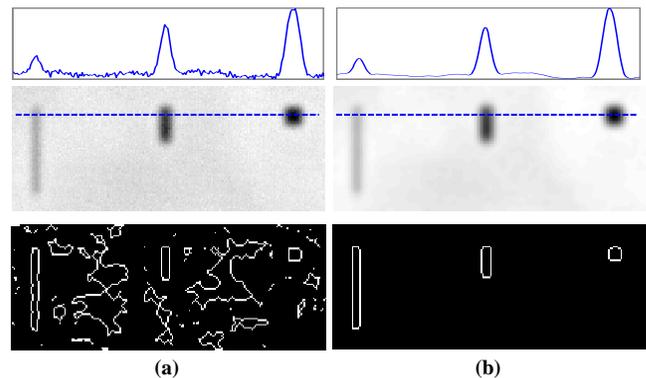


Fig. 6. Resultados de segmentación (a) fasegrama no filtrado; y (b) fasegrama filtrado con un filtro gaussiano de varianza $\sigma=2$.

Sobel, Roberts, Canny, etc. El principal problema es el de determinar el instante o frecuencia más adecuados para esto. En el dominio temporal, el tiempo de contraste máximo t_{\max} , es una opción. Este tiempo puede encontrarse para cada píxel al examinar la secuencia completa. Sin embargo, algunos estudios sugieren que el tiempo de contraste medio (la mitad del contraste máximo) o el tiempo de máxima pendiente o bien el tiempo de inicio del contraste térmico son más adecuados como parámetros de decisión ya que en dichos instantes hay un menor impacto de la difusión y el contorno obtenido se acerca más al verdadero tamaño y forma del defecto. Esto puede constatarse al examinar los termogramas de la figura 5, que muestra los termogramas simulados y reales a tres diferentes tiempos.

D. Métodos de inversión de la profundidad

Existen actualmente métodos de inversión de la profundidad tanto en el dominio temporal como en el frecuencial. Por ejemplo, en el dominio del tiempo, la mayoría de estas técnicas requieren de una etapa de calibración a partir de la cual los datos experimentales pueden ser sometidos a un proceso de regresión con una relación empírica de la forma:

$$z = A \cdot t_{\max}^{1/2} \cdot C_{\max}^h \quad (6)$$

Los parámetros A y h se determinan por regresión.

En el dominio frecuencial, los métodos de inversión tanto en LT [10] como en PPT [11], se basan en una relación directa entre la profundidad z , y la difusividad térmica μ , evaluada a

la frecuencia límite f_b [12]:

$$z = C_1 \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot f_b}} \quad (7)$$

donde la constante de regresión C_1 toma un valor igual a la unidad cuando se trabaja con imágenes de amplitud, y un valor de aproximadamente 1.8 en el caso de la fase, una razón más para optar por la fase en análisis cuantitativos.

Por ejemplo, la figura 7 presenta los perfiles de fase para los tres defectos marcados como A, B, y C. Los tres defectos se encuentran a la misma profundidad (1 mm) y poseen la misma área. Debido a que la difusión de calor es una función

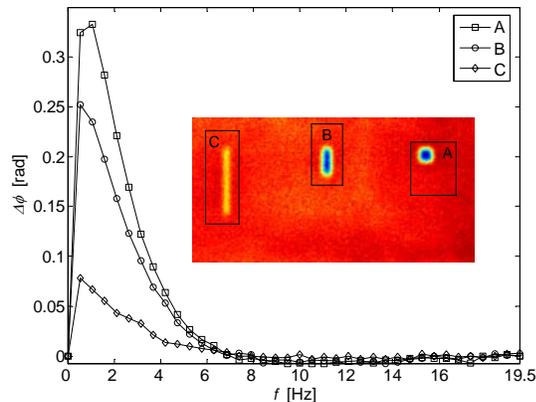


Fig. 1. Curvas de evolución de fase para una zona sana (—), de fase para una región defectuosa (—), y de contraste de fase (---).

de la geometría de los defectos (ver figura 5), la intensidad de la fase es diferente para los tres defectos. Sin embargo, la frecuencia límite f_b , es la misma para los tres defectos, lo que permite realizar una cuantificación a través de la Ec. (7).

VI. CONCLUSIONES

La Termografía Infrarroja es una herramienta de gran utilidad para la Evaluación No Destructiva de materiales y sistemas. Los avances de los últimos años en materia de métodos de tratamiento de señales y análisis de imágenes, han contribuido a aumentar el interés en la TI. En general, una secuencia de termogramas requiere de una etapa de preprocesado (para corregir los píxeles muertos, el viñeteo y el FPN, y una transformación en temperatura). Diferentes técnicas de análisis de imágenes existen. En esta comunicación se han presentado algunas de las más representativas en un intento de dar a conocer la Termografía Infrarroja a la comunidad científica especializada en el procesado de señales y en el análisis de imágenes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la ayuda brindada por Hernán Benitez de la Universidad del Valle de Colombia durante la redacción de este artículo.

REFERENCIAS

[1] American Society For Nondestructive Testing - ASNT, "Infrared and Thermal Testing", Nondestructive Handbook on Infrared Technology, Volume 3, ASNT Handbook Series, X. Maldague technical ed., P. O.

Moore ed., 3rd edition, Columbus, Ohio, ASNT Press, 2001, 718 p.
 [2] Maldague X. P. "Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing," John Wiley & Sons, N. Y., 2001.
 [3] Carslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of Heat in Solids, 2nd edition, Clarendon Press, Oxford, 1986.
 [4] Pilla M., Klein M., Maldague X., Salerno A. "New Absolute Contrast for Pulsed Thermography," Proc. QIRT, Eurotherm Seminar 64, 2002.e.
 [5] González D. A., Ibarra-Castanedo C. Pilla M., Klein M., J. M. López-Higuera and Maldague X. "Automatic Interpolated Differentiated Absolute Contrast Algorithm for the Analysis of Pulsed Thermographic Sequence," Proc. QIRT 7, 2004.
 [6] Maldague X. P. and Marinetti S. "Pulse Phase Infrared Thermography," J. Appl. Phys., vol. 79, no. 5, 1996, p. 2694-2698.
 [7] Bracewell R. The Fourier Transform and its Applications, USA, McGraw-Hill, 1965.
 [8] Wu D. and Busse G. "Lock-in Thermography for NonDestructive Evaluation of Materials," Rev. Gén. Therm., vol. 37, 1998, p. 693-703.
 [9] Shepard S. M. 2001, "Advances in Pulsed Thermography", Proc. SPIE, Thermosense XXIII, 4360: 511-515.
 [10] Meola C. and Carlomagno G. M. "Recent Advances in the Use of Infrared Thermography", Meas. Sci. Technol., vol. 15, 2004, p.27-58.
 [11] Ibarra-Castanedo C. and Maldague X. "Pulsed Phase Thermographic Reviewed," Qirt J., vol. 1, no. 1, 2004, p 47-70.
 [12] Ibarra-Castanedo C. Quantitative Subsurface Defect Evaluation by Pulsed Phase Thermography: Depth Retrieval with the Phase, Ph. D. thesis, Université Laval, 2005.



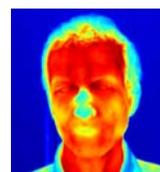
Clemente Ibarra-Castanedo (M'02) se graduó como Ingeniero Mecánico Electricista en la Universidad Regiomontana de Monterrey (Nuevo León) México. Obtuvo el título de Maestría en Ingeniería Mecánica en la Universidad Laval de Quebec, Canadá, en donde actualmente es candidato al grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica. Como miembro del Laboratorio de Vision y Sistemas Digitales de dicha institución ha colaborado en la redacción de más de 25 publicaciones en el área de Termografía Infrarroja. Es miembro del ASME, IEEE y SPIE.



Daniel A. González obtuvo el título de Ingeniero Técnico de Sistemas de Telecomunicación y el título de Ingeniero de Telecomunicación ambos por la Universidad de Cantabria en Santander, España, en 1996 y 1999 respectivamente. Actualmente trabaja para la obtención del doctorado en el Grupo de Ingeniería Fotónica de la misma universidad. Sus áreas de interés incluyen la Termografía Infrarroja y la medida de temperatura mediante sensores ópticos, donde es co-autor de más de 15 publicaciones.



Abdelhakim Bendada obtuvo su diploma de doctorado por el Instituto Nacional Politécnico de Lorena, Francia, en 1995. En 2005, se integró al cuerpo profesoral del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Laval, Quebec, Canadá. Sus intereses se centran principalmente en la Evaluación No Destructiva por Termografía Infrarroja y el Procesado de Imágenes. Es autor o co-autor de más de 60 publicaciones en la materia. Es miembro del SPIE y el OSA.



Xavier Maldague ha sido profesor en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Laval desde 1989 (y Director del Departamento desde el 2003). Sus intereses de investigación se centran en la Termografía Infrarroja, la Evaluación No Destructiva y en el desarrollo de técnicas de visión y sistemas digitales para la Inspección Industrial. Es autor y co-autor de más de 130 artículos, tres libros y una patente en estos temas. Es miembro de CINDE, ASNT, IEEE y coeditor de la Can. Journal of Electrical and Computing Engineering.