

Análisis de termografías infrarrojas dinámicas mediante técnicas de procesamiento de imágenes

Analysis of Dynamic Infrared Thermographies through the Application of Image Processing Techniques

E. L. Pencue Fierro^{a,*}
D. A. Bravo Montenegro^a
M. M. Patiño Velasco^a

Resumen

El acceso a imágenes fuera del espectro visible ha abierto grandes posibilidades para la caracterización de procesos y materiales en muchas áreas de la actividad humana; particularmente, las termografías son notablemente útiles en el estudio del comportamiento de los fenómenos de propagación del calor; en este caso, los análisis se han limitado a verificar distribuciones de calor en un momento dado y solo estáticamente. El enlace temporal de las isotermas y de los centros de generación del calor permite obtener información de carácter dinámico y realizar análisis más completos sobre el comportamiento de los equipos o materiales bajo estudio. En este trabajo se presentan los resultados de aplicar técnicas de análisis de secuencias de imágenes a termografías de diferentes procesos; se demuestra que con ellas se logra un entendimiento más preciso del comportamiento del calor al circular por los objetos, de cómo sus fuentes y sumideros asimilan diferentes condiciones y de la evolución general de flujos constantes o variables de perfiles de temperatura.

Palabras clave: Termografía infrarroja, Procesamiento de imágenes, Análisis de materiales.

Abstract

Access to images out of visible spectrum range has opened a wide field of possibilities for processes and material characterization in many areas of human activity. Thermography is particularly useful in analyzing the behavior of heat propagation phenomena. In this case, the analysis has been limited to verify the heat distribution at a given time, it means, the static aspect of the phenomena. The temporary connection of isotherms and heat generation areas can yield dynamic information that enables a more comprehensive analysis of equipment or materials behavior of interest. This paper presents the results obtained from the application of analytical techniques in different processes of some image sequences. The results show that it achieves a more precise understanding of the heat behavior circulation through the objects, it also reveals how sources and sinks assimilate the different conditions and the temperature profiles trends of constant or variable flow's general evolution.

Key words: Infrared Thermography, Image Processing, Material Analysis.

^aDepartamento de Física. Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

*Autor de correspondencia:leonairo@unicauca.edu.co

1. Introducción

En la industria actual, la producción de cantidades considerables de elementos defectuosos es una de las causas principales de pérdidas; por esta razón se invierte permanentemente en equipos y tecnología que permitan minimizar los defectos de producción. Para garantizar la calidad se hace necesario realizar ensayos que establezcan las características del producto y permitan compararlas con los estándares establecidos; sin embargo, la realización de estas pruebas afecta las líneas de producción, encareciendo el proceso y el producto final. Para minimizar gastos, los métodos utilizados en control de calidad deben ser de bajo costo, no destructivos y ágiles en la toma y el análisis de las muestras [1].

La temperatura es una medida de la energía térmica contenida en un objeto, y determina la dirección del flujo neto de calor entre dos objetos o zonas del mismo objeto. El calor se transfiere por tres mecanismos: conducción, convección y radiación; en este trabajo se abordan dos: radiación para la captura y registro del patrón bidimensional proyectado de distribución de temperatura y la conducción para los fenómenos térmicos que ocurren en el interior del cuerpo analizado cuando está sometido a esfuerzos térmicos y que es dependiente de la homogeneidad y las propiedades térmicas de la muestra [2].

La termografía es una técnica que transforma la radiación infrarroja del rango térmico en una imagen termográfica, por lo que es una representación de la distribución de temperatura de la superficie del objeto [3]. Es una técnica muy rápida que permite pruebas sin contacto, por lo que no es destructiva; además, permite determinar defectos en las muestras a partir de la variación de sus propiedades térmicas [4]. Su rango de aplicaciones es muy amplio, por lo que puede aplicarse en un gran número de procesos tanto a nivel industrial como investigativo. En la figura 1 se presentan termogramas correspondientes al ciclo de calentamiento de uno de los dispositivos analizados; en los tonos fríos se muestran las temperaturas más bajas, y en los cálidos, las altas; se observa la presencia de centros activos de calor y cómo este se va difundiendo a través de la estructura.

El desarrollo reciente de cámaras termográficas precisas ha alcanzado un nivel en el que es posible obtener este tipo de sensores a precios asequibles para un amplio sector, por lo que actualmente la

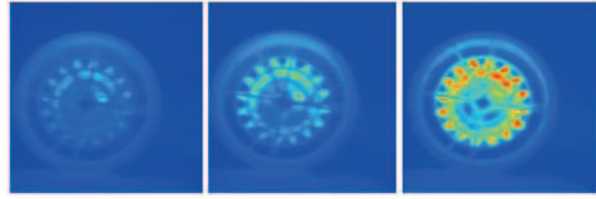


Figura 1. Termografías del calentamiento de una pistola de aire caliente.

termografía infrarroja se constituye en una técnica que cumple con los requisitos para el control de calidad de materiales y productos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de la termografía infrarroja dinámica para el análisis del comportamiento de los flujos de calor en los materiales y su aplicación en pruebas de control de calidad.

2. Conducción de calor

A nivel macroscópico y bajo dinámicas lentas, el transporte de calor en los sólidos está determinado por la ecuación de conducción de calor [2]:

$$\nabla^2 T + \frac{1}{k} g(x, y, z, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Donde T es la temperatura; k , la conductividad térmica; $g(x, y, z, t)$, la distribución volumétrica de la fuente de calor, y α , la difusividad térmica.

Considerando dos dimensiones para el caso de objetos de geometría predominantemente plana, la ecuación se reduce a:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{1}{k} g(x, y, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

Sobre la superficie de un objeto, la distribución de temperatura espacial $T(x, y)$ y temporal se puede registrar con una cámara infrarroja en el dominio térmico. Las derivadas parciales se pueden medir directamente de una secuencia de imágenes infrarrojas de la superficie del objeto analizado.

Para un k y un α dados, y una secuencia de imágenes infrarrojas adquiridas, se puede estimar la distribución de la fuente $g(x, y, t)$, resolviendo la ecuación 2:

$$g(x, y, t) = \frac{k}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} - k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (3)$$

donde k/α es equivalente a la densidad por el calor específico, ρC_p .

La ecuación anterior brinda una forma de evaluar la distribución de fuentes de calor de objetos de geometría predominantemente plana a partir imágenes térmicas de la temperatura de la superficie del objeto. Cuando la temperatura alcanza una distribución estacionaria, la ecuación 3 se convierte en independiente del tiempo, por lo que se simplifica el análisis del sistema y es posible obtener con mayor precisión la distribución de fuentes de calor, ya que se elimina de la ecuación la influencia del coeficiente de difusividad α .

Infortunadamente, los objetos reales de interés no son planos ni de geometrías sencillas; además, tienen propiedades térmicas que no son fáciles de establecer, por lo que es difícil llegar a una solución analítica [5]. Una cámara térmica solo puede registrar la temperatura superficial, por lo que el término de difusión hacia la profundidad en la ecuación 1 no es medible, pero aún es posible aplicar la ecuación 3 sobre la superficie, aunque debido a las condiciones presentes en los objetos reales no es posible establecer una solución exacta o que permita cuantificar físicamente alguno de los parámetros de la solución.

La aplicación de la ecuación 3 para dilucidar propiedades térmicas características del objeto de estudio implica el cálculo de derivadas espaciales de segundo orden, y temporales de primer orden. Para el tratamiento de información discreta, como lo es un termograma, se deben llevar estas expresiones al dominio digital. En el campo del procesamiento digital de imágenes se han desarrollado una serie de operadores que realizan este tipo de cálculos de forma rápida a partir de la información contenida en la imagen, los cuales se usan en multitud de aplicaciones. Sin embargo, las derivadas de primer y segundo orden tienen un problema muy notable, que consiste en que son muy sensibles al ruido impulsivo, por lo que amplifican fuertemente el ruido presente en la termografía. Debido a esto se hace necesario implementar filtros en el dominio del espacio (paso bajo Gaussiano) y en el del tiempo (promediado) para atenuar los niveles de ruido antes de obtener las derivadas [6].

Otro problema que se presenta está relacionado con la dinámica interna del calor, principalmente si se trata de objetos con geometrías complejas y compuestos por la asociación de diversos materiales; en este caso, $g(x, y, z, t)$ no se puede estimar, y los

análisis se limitan a establecer cómo fluye el calor e interactúa en la superficie analizada [7]. A partir de esta información se estiman las propiedades térmicas del material y se concluye, de manera cualitativa, acerca del funcionamiento interno del dispositivo.

3. Desarrollo experimental

Se realizó un montaje de captura de imágenes térmicas con ayuda de la cámara IR SnapShot 525 de Infrared Solutions Inc, que permite obtener termogramas con una resolución de 120×120 píxeles y puede censar temperaturas de 0 a 650°C . La captura de termografías presenta dos parámetros fundamentales que se deben tener en cuenta para realizar una toma confiable: la temperatura del ambiente y la emisividad del material [3]. En el caso de la temperatura ambiental es importante conocer la temperatura del fondo, porque parte de esa radiación impacta el objetivo y puede contribuir a errores en las medidas; se usó el método del reflector difuso para compensar este efecto. Para la emisividad se recurrió a tablas de constantes para los materiales conocidos; en el caso de materiales no conocidos se implementó el método del emisor de referencia para estimarla. El campo de vista de la cámara se adecuó a las dimensiones del objeto analizado, de manera que se manejaron diferentes distancias a la escena, por lo que las medidas realizadas se obtuvieron en forma de parámetros relativos, lo que no resta generalidad al análisis, debido a que en este estudio interesan más las dinámicas que cuantificar el flujo de calor como tal; sin embargo, es posible estimar la influencia de este parámetro, pero no se hizo en este trabajo.

Entre los objetos analizados se pueden enumerar: un disco duro, un motor de automóvil, una pistola de aire caliente y varillas; estos dispositivos fueron sometidos a ciclos de calentamiento y enfriamiento periódico.

4. Resultados y análisis

Para describir el análisis se toman como referencia los resultados obtenidos para el disco duro. Se inició el computador, y los cabezales de lectura y escritura se forzaron a permanecer siempre en funcionamiento, aplicando estrategias que garantizaran su uso continuo; esto con el objetivo de maximizar la generación de calor propia del dispositivo. Se registraron termografías cada 20 segundos durante 5

minutos; luego, se apagó el sistema y se tomaron termografías cada 30 segundos durante 2 minutos.

En la figura 2 se presenta el ciclo de calentamiento-enfriamiento observado sobre la cubierta metálica del disco duro. La parte izquierda se muestra en falso color para ilustrar mejor la forma como el calor se va generando y dispersando sobre toda la superficie. Las imágenes de la derecha corresponden a la representación a escala de los valores de temperatura sobre la superficie del disco, a medida que este se calienta. En ellas, el valor de cada píxel es proporcional al valor de la temperatura medida, por lo que entre más alto el nivel de gris, mayor es la temperatura.

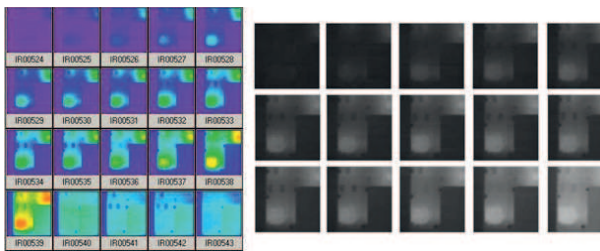


Figura 2. Termografías capturadas de un disco duro en calentamiento y enfriamiento (izquierda en falso color) e interpretación en niveles de gris durante el calentamiento (derecha en niveles de gris).

Aunque los fenómenos térmicos son de gran importancia en los procesos industriales, los análisis generalmente se limitan a termogramas estáticos. A partir de la visualización y cuantificación de isotermas a varias temperaturas, se pretende dilucidar el comportamiento general del calor en el objeto, pero es discutible que se pretenda obtener medidas precisas de un proceso de dinámicas muy marcadas a partir de un cuadro congelado en el tiempo; en la figura 3 se hace alusión a este enfoque. A partir de una muestra se obtiene la configuración general de los frentes de calor, y se espera que estos sirvan para hallar las fuentes generadoras (derecha) o para predecir el comportamiento posterior a partir del establecimiento de los gradientes de temperatura (centro). Esto último es cierto solo si se apagan todas las fuentes; de otra manera, solo es una aproximación y no se debe tener en cuenta de manera formal en sistemas en donde la transferencia de calor es una variable de importancia.

La presente investigación evalúa metodologías para establecer las fuentes, caracterizar los materiales observados y encontrar posibles tendencias que permitan inferir comportamientos a futuro en los dispo-

sitivos. Los procesos realizados están basados en la información presentada en la figura 2. En la figura 4 se han seleccionado unos cuadros clave, intermedios en todo el proceso, para medir y seguir los frentes de cambio de temperatura; sobre estos se establecieron unos puntos de interés, que por sus características permiten hacer un seguimiento más preciso para hallar las tendencias. Los gradientes de temperatura permiten obtener tendencias de cuadros estáticos; la idea es caracterizarlos para obtener información de las etapas posteriores. Lo principal, en este caso, es establecer una medida de la rapidez del proceso, conociendo la distancia temporal entre estos; con esta información se obtiene un parámetro importante para escalar correctamente las derivadas temporales de la ecuación 2. Desde esta perspectiva, los histogramas de los niveles de temperatura de los cuadros clave permiten aclarar el panorama del fenómeno. En la figura 5 se presentan algunos de ellos y se puede observar la variación de su comportamiento.

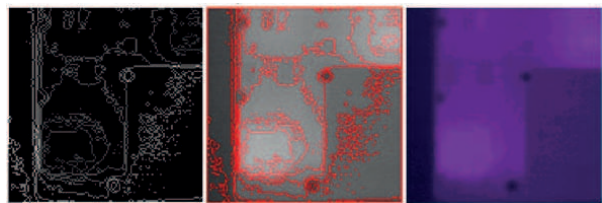


Figura 3. Análisis estático de isotermas variables: Iso-termas variables (izquierda), superposición sobre el termograma (centro), acumulación del historial para establecer posibles fuentes (derecha).

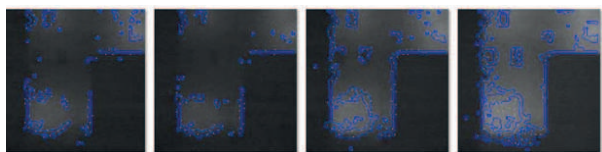


Figura 4. Cuadros clave de análisis para establecer los puntos de interés en los gradientes de temperatura y los histogramas correspondientes.

Es muy notable el cambio espacial (eje horizontal) y temporal (variación de cada histograma) predicho por la ecuación 2, por lo que esta cobra mayor validez como descriptora del fenómeno, representando así una herramienta clave para el análisis.

En el análisis dinámico, contrario al análisis estático por isotermas variables, se establecen isotermas constates sobre cuadros sucesivos capturados. En este caso, al tener una temperatura constante para las isotermas se garantiza el seguimiento cercano de los

frentes de calor a medida que van evolucionando, por lo que este enfoque representa un mejor acercamiento al fenómeno. La evolución de las isothermas es un punto de referencia constante y garantiza el aspecto dinámico subyacente al fenómeno de propagación de calor. Hay que recordar que se observa la superficie del dispositivo y que todo el proceso sucede internamente, por lo que, aun así, es una aproximación.

La figura 6 presenta los resultados obtenidos con este enfoque; su comparación con la figura 3 permite concluir que con el análisis estático no es posible obtener frentes de calor consistentes y que no está libre del ruido de las isothermas extremas; por el contrario, el análisis dinámico es simple, pero efectivo, por lo que constituye una buena herramienta para el análisis del comportamiento térmico del objeto de prueba y además permite identificar mejor las zonas donde posiblemente estén las fuentes de calor. Así mismo, volviendo a la ecuación 2, y apagando la fuente, $g(x, y, z, t)$, tal como se ilustra en la figura 2 (última fila), es posible despejar la difusividad al hacer $g(x, y, z, t) = 0$, solo queda por encontrar entonces el Laplaciano en 2D y la derivada temporal, que se puede hallar de acuerdo con los parámetros de escalado obtenidos de los cuadros clave.

El Laplaciano es muy conocido en procesamiento de imágenes, y se calcula haciendo una convolución con un kernel de 3×3 [8], en el que los índices representan derivadas espaciales de segundo orden (Laplaciano); este kernel puede tener varias configuraciones, pero las pruebas arrojaron que produce mejores resultados el kernel de 8 vecinos. La derivada temporal se obtiene de cuadros sucesivos modulados por el índice dado en el análisis de gradientes. Esta operación resulta en la obtención de un parámetro importante del material: la difusividad α , tal como aparece en la figura 7 (izquierda); por lo tanto, se tiene una herramienta de caracterización de materiales basada en su respuesta a los frentes de calor y sin tomar contacto con la muestra. El lado derecho de la figura presenta las fuentes de calor obtenidas.

A partir de este enfoque, y utilizando la ecuación 3, es posible determinar la fuente $g(x, y, z, t)$; sin embargo, es necesario conocer α y k , aunque este último se puede estimar o tomar como unitario, para efectos prácticos. El procedimiento es el siguiente: a la variación temporal se le sustrae el Laplaciano (doble variación espacial), por lo que las fuentes son el re-

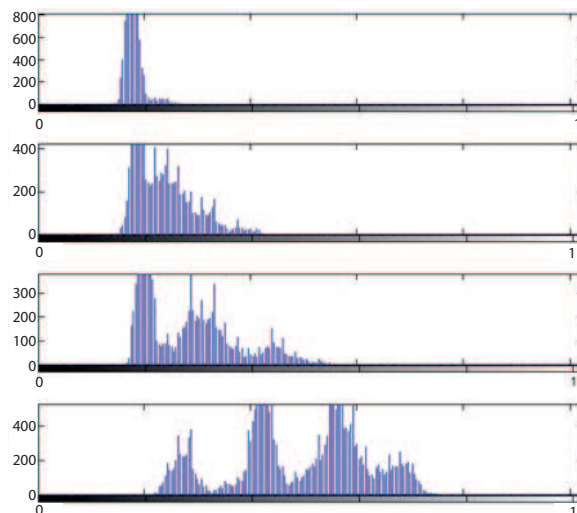


Figura 5. Histogramas variables de los termogramas de la figura 4. En las abscisas se tienen las temperaturas relativas, y en las ordenadas, la frecuencia de ocurrencia de cada temperatura.

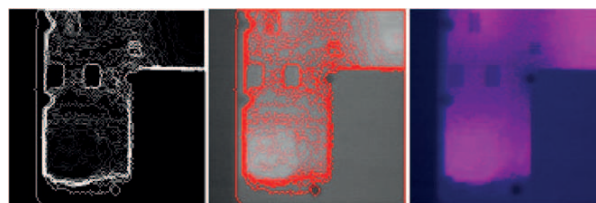


Figura 6. Análisis dinámico de isothermas constantes: Isothermas en el tiempo (izquierda), superposición sobre el último termograma (centro), acumulación del histograma para establecer posibles fuentes (derecha).

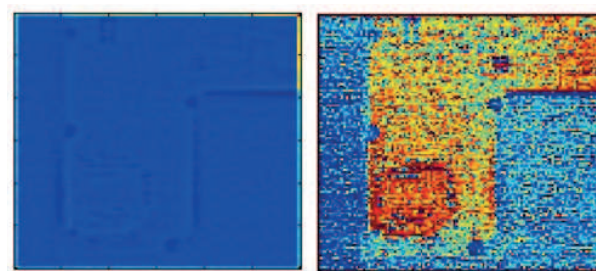


Figura 7. Difusividad térmica calculada (izquierda) y fuentes de calor (derecha).

sultado de la variación temporal compensada por la variación espacial de los frentes de calor. En la parte derecha de la figura 7 se presenta el resultado de esta operación; en ella se puede observar la congruencia con el resultado obtenido en la figura 6 (derecha), por lo que, en teoría, se han abordado métodos que presentan mucha coherencia entre sí y se cuenta, entonces, con una herramienta de caracterización del material y de posible predicción del comportamiento del calor al circular por el objeto.

En este estudio se escogieron procesos térmicos que involucraran horizontes de tiempo inferiores a 15 minutos; sin embargo, extrapolar los resultados a mayores horizontes temporales es sencillo, teniendo en cuenta que se obtienen índices de movilidad en el análisis de gradientes. Hay que tener en cuenta los aspectos de calibración y las posibles fuentes de ruido que pudieran afectar negativamente las mediciones, sabiendo, además, que el cuerpo humano es un gran emisor de infrarrojo térmico y por sí mismo puede ser la mayor fuente de ruido en la toma de las termografías. Esto implicó tomar precauciones especiales no previstas, por ejemplo, en la toma de imágenes en el rango visible del espectro.

5. Conclusiones

Se determinó de manera precisa la distribución de temperatura estática y dinámica en superficies de diferentes objetos sometidos a estrés térmico. El análisis dinámico permitió la observación de la distribución de la energía sobre el objeto y su evolución hasta alcanzar un patrón fijo. Se estimó la difusividad del objeto y las fuentes de calor por dos métodos: análisis de isothermas constantes y por combinación de operadores. Los dos esquemas presentaron información importante para entender las dinámicas térmicas internas de los objetos a partir de la evolución observada desde su superficie.

Agradecimientos

A la Universidad del Cauca, por el apoyo para el desarrollo de esta investigación. El presente trabajo fue realizado bajo el proyecto BPIN 0020-05492-0000.

Referencias

- [1] D. Wu and G. Busse, “Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials”, *Revue Générale de Thermique*, vol. 37, no. 8, pp. 693-703, 1998. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0035315998800470>
- [2] C.-S. Liu, “On-line detecting heat source of a nonlinear heat conduction equation by a differential algebraic equation method”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 76, no. 0, pp. 153-161, 2014. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931014003445>
- [3] M. Clark, D. McCann, and M. Forde, “Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges”, *{NDT} & E International*, vol. 36, no. 4, pp. 265-275, 2003, structural Faults and Repair. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869502000609>
- [4] S. Gryz, “New thermal contrast definition for defect characterization by active thermography”, *Measurement*, vol. 45, no. 7, pp. 1885-1892, 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224112001376>
- [5] G. Carlomagno and G. Cardone, “Infrared thermography for convective heat transfer measurements”, *Experiments in Fluids*, vol. 49, no. 6, pp. 1187-1218, 2010. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-010-0912-2>
- [6] F. Catté, P.-L. Lions, J.-M. Morel, and T. Coll, “Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion”, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, vol. 29, no. 1, pp. 182-193, 1992. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/2158083>
- [7] Y. Hung, Y. Chen, S. Ng, L. Liu, Y. Huang, B. Luk, R. Ip, C. Wu, and P. Chung, “Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation”, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 64, pp. 73-112, 2009. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X08001216>
- [8] F. Shih, *Image Processing and Pattern Recognition: Fundamentals and Techniques*. Wiley, 2010.