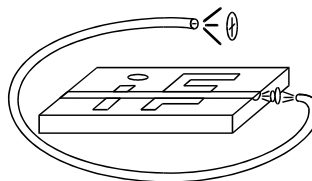


UC

UNIVERSIDAD
DE CANTABRIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

TESIS DOCTORAL

**CONTRIBUCIONES A LAS TÉCNICAS NO
DESTRUCTIVAS PARA EVALUACIÓN Y PRUEBA DE
PROCESOS Y MATERIALES BASADAS EN
RADIACIONES INFRARROJAS**

Autor: **DANIEL AQUILINO GONZÁLEZ FERNÁNDEZ**
Director: **JOSÉ MIGUEL LÓPEZ HIGUERA**

SANTANDER, 2006

A mi madre y hermanos

“... Yo sólo puedo mostrarte la puerta. Tú eres el único que tiene que atravesarla”

Morfeo, Matrix (1999)

Traducción libre de un extracto del diálogo de Morpheus (Laurence Fishburne) con Neo (Keanu Reeves) en su visita al Oracle (Gloria Foster): *“I'm trying to free your mind, Neo. But I can only show you the door. You're the one that has to walk through it”*.

[The Matrix \(1999\)](#)

Escrita y dirigida por Andy Wachowski & Larry Wachowski.
Be Afraid Of The Future.

Reconocimientos

Los trabajos de investigación recogidos en esta tesis doctoral han sido posibles, en parte, gracias a los recursos de los proyectos de I+D en los que se han enmarcado:

- “Sensor Optoelectrónico para la medida de la TEMperatura de las PALanquillas en maquinas de colada Continua”, SOTEPAC, 1FD97-1996.
- “SUbsistemas fotónicos de Generación, conversión, Amplificación y procesamiento para Redes Ópticas de Sensores y datos”, SuGAROS,- TIC-2001-0877-C02-01.
- “Estructura Inteligente para Producción de Barras de Acero”, EIPBA, FIT070000-2002-121.
- “Sistemas y Redes Avanzadas de Sensores fotónicos”, SIRAS, TEC 2004-05936-C02-02/MIC.
- “Caracterización de materiales por espectrometría de imagen”, CIMACLIQ, TEC 2005-08218-C02-02.

Igualmente se agradece al Ministerio de Ciencia y Tecnología la concesión al autor de una beca FPI adscrita al proyecto SUGAROS TIC2001-0877-C02-01.

Agradecimientos

Tal vez el apartado que suscita una mayor reflexión en toda obra realizada es la exaltación de las gratitudes hacia quienes de una forma u otra han inferido en el autor durante la misma. En tal situación, me hallo en el desafío de sintetizar en unas pocas líneas todos los sentimientos que aparecen al recordar a las personas que a lo largo de mi vida me han ayudado, enseñado, guiado, tolerado, animado e incluso jaleado en la consecución de mis objetivos. Pero aún pecando de cruel y olvidadizo debo truncar la memoria y limitar este apartado que por ganas se convertiría en toda una obra por sí solo. Mi primer agradecimiento a todos aquellos que no son referidos a continuación pero que saben y que sé que debieran estar aquí. Y, ¡cómo no!, mi gratitud a todo lector por el interés que muestra en este humilde trabajo.

Ayudándome de la referencia cronológica, el punto de partida establecido para los agradecimientos es la decisión de emprender el doctorado. No es que no haya sido “curioso” con anterioridad, bien lo sabía mi padre, sino que considero este punto de mi vida como el inicio de mi carrera investigadora, de la cual es un fruto el presente documento. La persona a la que debo este inicio es César. Durante más de doce años ha sido un guía, un consejero y un ejemplo. Gracias por estar a mi lado.

Di los primeros pasos de la mano de Pepe quien me mostró las inquietudes del mundo de la Óptica y la Fotónica y soportó las innumerables dudas y quebrantos a las que como “novato” le tenía acostumbrado. Gracias a él y sus detalladas correcciones fui aprendiendo y formándome. Y llegué a integrarme en el Grupo de Ingeniería Fotónica. Gracias José Miguel por guiarme hasta la madurez y ofrecerme tu tiempo, conocimiento y experiencia en muchas facetas que incluso se salen de la componente profesional. Gracias por hacerme sentir a gusto y rodeado de los míos. Porque en el Grupo de Ingeniería Fotónica encontré una familia donde todos sus miembros han hecho posible que lo considerado por otros como trabajo o estudio yo lo considere una alegría. Muchas horas, muchos días; pero en verdad hablo de un laboratorio como mi casa ante la fraternidad y amistad encontrada en sus miembros: Adolfo, Alex, Ana, Andrés, Bea, Berto, Bobín, Bubka, Carlos, Chux, Cris, David, Esaú, Fran, José Miguel “junior”, Juan, María, Marian, Mauro, Nicolas, Pedro (Alonso, I y II), Puma, Olga, Sergi, Toñete y Vik. No es exageración, nos hemos conocido, consentido y aguantado casi a diario durante los últimos 7 años en la mayoría de los casos, 12 años (¿verdad, Toñete?), o incluso más (cantidad indeterminada pero inferior a 30, ¿verdad, Chux?). En especial, gracias a Fran por todo su apoyo y estar siempre dispuesto a embarcarse conmigo en proyectos y aventuras

propias de gigantes. Y no me olvido de Bea y Sara, siempre atentas. GRACIAS a todos porque sin vosotros no hubiera sido posible llegar a terminar esto. Y es que el considerarse como en casa resuelve muchas complicaciones, te da seguridad y protección y te facilita la “existencia” permitiéndote una mayor dedicación y un mayor optimismo a los quehaceres diarios.

Me siento muy afortunado de contar con varias familias. No solamente la natural y el Grupo de Ingeniería Fotónica. Allá donde he ido he procurado y, afortunadamente conseguido, conocer y desenvolverme en ambientes familiares que, lejos de casa, son aún más necesarios. Así ... ¡gracias, Clemente! por ser tú quien me fuera a buscar al aeropuerto el 1 de mayo de 2003. Llegaba a un país lejano y extraño, con dificultades con el idioma y siendo la primera vez que salía de casa, como quien dice. Hemos compartido buenos y malos momentos pero aún los malos no lo han sido tanto al tener tu apoyo. Gracias Xavier por permitirme ir, formarme, seguir con mis divagaciones y conocer a toda esa gente que llenó mi ser de nuevas experiencias, conocimientos, inquietudes, anhelos y tristezas al separarnos. Gracias Alma, Eduardo, Eric, Hermes, Janis, Jassine, Julián, Laurotta, Martina, Paloma, Pamela, Rafael, Silvietta y Soledad por hacer de Québec mi segundo hogar. Gracias Lilián.

Y Bath, otro lugar donde volveré y donde también dejé amigos y familia. Gracias familia Way, Simon, Tim y, por supuesto, Darryl que hiciste posible otro nuevo exponencial avance de mi experiencia personal y profesional.

Gracias a mis amigos: Ángel, Casco y familia, David, Dita y Edu, Eduardo, Joserra, Marga, Marina, Nacho, Nando, Pablete, Pablo, Patri y Vito; sus consejos y paciencia conmigo no tienen fin. Gracias a mis amig@s del instituto, los momentos lúdico-festivos en su compañía han servido de vía de escape y aliviado el estrés ante este proyecto.

Y, obviamente, gracias a mi familia natural. Ellos saben más que nadie el esfuerzo que este trabajo ha supuesto. Para ellos está dedicada esta obra.

A todos vosotros, mi sincera gratitud.

Resumen

La inspección térmica basada en radiación infrarroja provee medidas rápidas, sin contacto y desde una única posición. Su principio básico es el control y estimación de diferencias de temperaturas en una superficie o cambios de la temperatura superficial con el tiempo, haciendo uso de los sistemas de medida mediante infrarrojos. Esta temperatura está relacionada con los patrones de transferencia de calor del cuerpo bajo inspección por lo que se logra una localización de defectos o imperfecciones superficiales y de anomalías subsuperficiales. En este último caso, de forma general, cuanto mayor sea y más cercana a la superficie esté la imperfección, más evidente resultará su detección al producir mayores diferencias térmicas en la superficie.

Conscientes de la aplicabilidad potencial de la termografía infrarroja en la evaluación no destructiva ni invasiva, se planteó como objetivo general de esta tesis el efectuar contribuciones al conocimiento y la técnica que, además, tuviesen visos de aplicación real. Para ello se han identificado “nichos de aplicación” entre los que se destacan el control de procesos (particularmente en industrias siderúrgicas), la evaluación de la calidad de productos manufacturados (elementos calefactores en cocinas) y la inspección, análisis y evaluación de defectos en estructuras compuestas.

Con el objetivo general en mente y ante la variedad de sistemas termográficos existentes, de diferentes costes y sensibilidades, se detectan carencias de unos respecto de otros que limitan su aplicabilidad. Igualmente, surge la necesidad de compararlos y con ello la definición de parámetros que de forma objetiva valoren los beneficios de cada uno de ellos. Dentro de la evaluación de defectos internos en estructuras u objetos, el concepto de *área de detectabilidad* es utilizado para la comparación de sistemas de termografía activa pulsada de duración cuasi-instantánea y de duración larga. Escoger la excitación térmica apropiada solventa limitaciones de digitalización en sistemas de bajo coste. Una validación de este concepto denota la obtención de resultados comparables para sistemas comerciales de gran sensibilidad basados en termografía activa de flashes y otros hechos a medida de menor calidad pero que

aprovechan el mayor contraste térmico inducido por las excitaciones de pulso largo.

Igualmente se procura una *automatización* de los procesos de toma de decisión para eludir, en la medida de lo posible, la subjetividad en el análisis de las secuencias térmicas que resta sensibilidad a los resultados cualitativos y cuantitativos que se desprenden del mismo. Para ello se utilizan conceptos de Visión Artificial (Machine Vision, Computer Vision o Intelligent Vision) mediante los que se simula la habilidad del reconocimiento y análisis del sistema humano de ojo y cerebro para tomar decisiones y ofrecer una interpretación sobre el contenido de una imagen. La posibilidad de adquirir imágenes, analizarlas y realizar la toma de decisiones apropiadas, todo de forma autónoma y automática, es extremadamente útil en aplicaciones de inspección y control de calidad. Se aportan diferentes propuestas basadas en métodos estadísticos y técnicas transformadas propios del tratamiento de imágenes que procuran imágenes únicas donde todos los defectos detectables son localizados. Así se logra la automatización plena del proceso de detección de anomalías internas. El procesado de las secuencias termográficas es reducido al uso de una función que elimina la subjetividad inherente propia de las decisiones humanas.

Utilizando con frecuencia la fusión de conocimientos y técnicas provenientes sobre todo de la Física (física del calor, mecánica y óptica principalmente) y de las TICs, en este documento se recogen las contribuciones más significativas aportadas al área de inspección no destructiva utilizando termografía infrarroja.

Abstract

Thermal inspection based on infrared radiation provides fast and contactless measurements from one location. Its basic principle is the control and assessment of temperature differences on a surface or changes in that measurement along time, using infrared equipment. This temperature is related to the heat transfer that occurs in the body under inspection. In this sense, it is possible to locate surface and subsurface defects and anomalies. In this last case, generally, the detection is easier as the imperfections become bigger and shallower. This is due to the fact that the thermal differences produced on the specimen surface are abnormally different respected to sound area thermal differences.

Given the potential applicability of infrared thermography for non-destructive and non-invasive evaluation and testing, the main goal of this thesis is the contribution to the knowledge and technique state of the art, always from a real-application point of view. Several application “niches” have been identified, being stood out process control (principally in siderurgical industry), quality assessment in manufactured products and the inspection, analysis and evaluation of defects in composite material structures.

Considering the objective mentioned above and the wide variety of thermographic systems, several lacks have been detected in some systems limiting their use. In addition, it could be interesting to compare these systems and hence, to establish a set of parameters that objectively evaluates the benefits of any of them. In non-destructive evaluations of subsurface defects in structures or materials, the concept of detectability area is used to compare systems excited by both long-pulse thermography and pulsed thermography. The selection of an appropriate excitation could lead to compensate low binarization limitations in low cost systems. A validation of this idea shows similar results for state-of-art high sensitivity systems based on pulsed thermography and cheaper lab-made systems. The latter takes advantage of the higher energy induced by long-pulse excitations to overcome the poor digitalization effects.

In addition, an automation of the decision process is provided to avoid, as much as possible, the human subjectivity in the analysis of thermographic sequences. Machine – Computer or Intelligent Vision concepts are used to

achieve this goal, simulating the recognition ability and analysis of the human brain and vision system to make decisions and offer an interpretation regarding a particular image. The possibility of acquiring images to analyse them and then decide over them, all automatically, is extremely useful in inspection processes and quality control. Here, different proposals based on statistical methods and data transforms are detailed. They provide unique images where defects are highlighted. The processing of thermographic sequences is simplified to just one single function that avoids the human subjectivity presented in the decisions, which should be taken in other processing procedures.

By frequently using a combination of knowledge and techniques coming from the Physics and ICTs, this dissertation collects the most significant contributions of the author to the NDE&T state of the art within infrared thermography field.

Listas de símbolos especiales

Simbolos (Unidades)

c capacidad térmica ($W \cdot s / Kg K$)
 C contraste térmico
 CP calor específico ($J / kg K$)
 e efusividad térmica ($W s^{1/2} / m^2 K$)
 F relación focal de la lente o espejo
 f_b frecuencia ciega o de corte (Hz)
 f_n enésima frecuencia (Hz)
 f_s frecuencia de muestreo (Hz)
 h coeficiente de convección, constante Planck ($W / m^2 K$)
 K coeficiente de veracidad
 k conductividad térmica ($W / m K$)
 L espesor (m)
 P espacio transformado
 Q conjunto de puntos
 Q energía absorbida por unidad de área (J / m^2) o potencia emitida (W / m^2)
 T temperatura (K, C)
 t tiempo (s)
 t_{acq} tiempo de adquisición u observación (s)
 $w(T)$ ventana de truncamiento temporal
 Z profundidad (m)

Letras Griegas (Unidades)

(ρ, θ) coordenadas polares
 α difusividad térmica (m^2 / s)
 Δ gradiente (temperatura o fase)
 ε emisividad
 λ longitud de onda (m)
 μ longitud de difusión (m)
 ρ densidad (kg / m^3)
 σ varianza o constante Stefan-Boltzman
 φ fase ($^\circ$ o rad)
 δ diferencial

Subíndices y superíndices

a absoluto
 amb ambiente
 b blind
 d, def defecto
 ef efectivo
 (i, j) coordenadas cartesianas
 l, ef instante efectivo
 m, max maximo
 mp óptima observación práctica
 n normalizado

n def, s, sound, soundarea libre de defectos
r running
s standard
sat saturación
o inicial

Constantes

h universal (o Planck), $h = 6.6256 \times 10^{-34}$ Js
c velocidad de la luz, $c = 2.9979 \times 10^8$ m/s
C1 primera constante de radiación, $C1 = 3.742 \times 10^8$ W $\mu\text{m}^4 / \text{m}^2$
C2 segunda constante de radiación, $C2 = 1.1389 \times 10^4$ $\mu\text{m K}$
C3 tercera constante de radiación, $C3 = 2897.8$ $\mu\text{m K}$
 σ Stefan-Boltzman, $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8}$ W / $\text{m}^2 \text{K}^4$

Acrónimos

CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic, Plástico reforzado de Fibra de carbono
DAC: Contraste Diferencial Absoluto
DAPHc: Contraste Diferencial Absoluto de la fase
END: Evaluación o Ensayo no destructivo
FPA: Focal Plane Array
FPN: Fixed Pattern Noise, Patrón de ruido fijo
FWHM: Anchura a altura mitad
GFRP: Glass Fiber Reinforced Plastic, Plástico reforzado de Fibra de vidrio
IDAC: Contraste Absoluto Diferencial Interpolado
IR: Infrarrojo
MDS: Tamaño detectable mínimo
MRTD: Diferencia de Temperaturas Mínima resoluble
MTF: Función transferencia de modulación
NDT&E: NonDestructive Testing and Evaluation, Evaluación y Prueba no destructivas
NEP: Potencia Equivalente de Ruido
NETD: Diferencia de Temperaturas equivalente al ruido
PCT: Termografía de Componentes Principales
PPT: Pulsed Phase Thermography, Termografía Pulsada de fase
PTHTa: Algoritmo de uso de la Transformada Hough en Termografía Pulsada
PTV: Primer termograma válido
SNR: Signal-to-Noise Ratio, razón señal a ruido
TFD: Transformada de Fourier Discreta
TI: Termografía Infrarroja
UTV: Último termograma válido

INDICE

PARTE 1 PRELIMINAR.....	1
1 Introducción.....	5
1.1 Energía térmica, calor y temperatura.....	5
1.2 Física del calor.....	6
1.3 Métodos ópticos para la medida de la transferencia de calor y de la temperatura.....	7
1.4 Motivación.....	9
1.5 Estructura del documento.....	12
2 Estado del arte de la termografía infrarroja.....	17
2.1 Situación y tendencias.....	17
2.1.1 Hardware.....	22
2.1.2 Software.....	23
2.2 Problemáticas detectadas.....	25
2.2.1 Efecto de la digitalización en las señales termográficas.....	25
2.2.2 Automatización del procesado de imágenes.....	28
2.3 Conclusiones y objetivos.....	29
PARTE 2 CONTRIBUCIONES.....	35
3 Detectabilidad de defectos subsuperficiales en sistemas de termografía activa con escasa digitalización.....	39
3.1 Introducción.....	39
3.2 Parámetros que definen la detectabilidad de defectos.....	40
3.2.1 Factores que influyen en la inexactitud de la medida termográfica.....	41
3.2.2 Factores que contribuyen a la detectabilidad de defectos subsuperficiales.....	42
3.2.2.a Detectabilidad en las termografías activas pulsadas.....	43
3.2.2.b Detectabilidad en función de las características de los defectos.....	48
3.3 Criterio de decisión.....	52
3.4 Criterio de detectabilidad ante una escasa digitalización.....	53
3.5 Compensación de una escasa digitalización.....	54
3.6 Discusión de los resultados.....	55
3.7 Conclusiones y resultados relevantes.....	56
4 Automatización del procesado de imágenes.....	61
4.1 Introducción.....	61
4.1.1 Adecuación de los tiempos de adquisición.....	61
4.1.2 La problemática del ajuste de una línea recta.....	68
4.2 Métodos estadísticos.....	69
4.2.1 Automatización IDAC.....	71
4.2.2 Métodos robustos de estimación estadística aplicados a la termografía infrarroja.....	74

4.3	Transformaciones en el espacio de datos	74
4.3.1	Transformada Hough.....	75
4.3.2	Transformada Radon	80
4.4	Identificación de patrones lineales.....	83
4.4.1	Fusión de procesados.....	83
4.4.1.a	Automatización de la obtención de la <i>frecuencia de corte</i>	85
4.4.1.b	Algoritmo DAPhC.....	86
4.4.2	Excitaciones eléctricas.....	89
4.5	Discusión de los resultados	92
4.6	Conclusiones y resultados relevantes.....	93
PARTE 3 CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS		97
5	Conclusiones y líneas futuras	99
	Resumen y conclusiones.....	99
	Líneas abiertas y futuros trabajos	101
PARTE 4 REFERENCIAS y ANEXOS		105
6	Bibliografía.....	107
6.1	Referencias por capítulos.....	107
6.1.1	Referencias del capítulo 1.....	107
6.1.2	Referencias del capítulo 2.....	107
6.1.3	Referencias del capítulo 3.....	108
6.1.4	Referencias del capítulo 4.....	108
6.2	Referencias ordenadas alfabéticamente	110
6.3	Contribuciones del doctorando consecuencia de la tesis.....	114
6.3.1	Contribuciones en el campo de la termografía infrarroja	114
6.3.2	Contribuciones en el campo de la medida de diferentes magnitudes mediante dispositivos ópticos.....	119
Anexos		123
A	Principios fundamentales de la Física del calor.....	125
B	Conocimientos y técnicas claves en termografía infrarroja	133
B.1	La medida termográfica	133
B.2	Modelado de la transferencia de calor.....	135
B.3	Termografía activa y pasiva	136
B.4	Preprocesado de imágenes en termografía infrarroja	138
B.5	Excitaciones ópticas en termografía infrarroja activa - Orientación conceptual.....	138
B.6	Tipos de excitación	139
B.7	Referencias.....	144
C	Aplicaciones industriales de la termografía infrarroja en las que el autor ha colaborado	147
C.1	Proyecto SOTEPAC.....	147
C.2	Proyecto ECOPLEI	156
C.3	Propuesta de Proyecto EIKA	161
C.4	Referencias.....	165
D	Técnicas de procesado de imágenes en secuencias termográficas.....	167
D.1	Preprocesado de secuencias termográficas – Precisión y exactitud en la medida de temperatura.....	167
D.2	Procesado de secuencias termográficas – Modelado Directo.....	170
D.3	Postprocesados de secuencias termográficas- Modelado Inverso	177
D.4	Referencias.....	179
E	Algoritmos de detección de patrones lineales.....	181
E.1	Algoritmo RANSAC.....	181
E.2	Transformada de Hough.....	182

E.3	La transformada Radon.....	185
F	Equipamiento utilizado	187
F.1	Laboratoire de Vision et Systèmes Numériques de l'Université Laval..	187
F.2	Materials Research Centre de University of Bath.....	188
F.3	Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria	190

PARTE 5 Summary..... 193

PARTE##
PRELIMINAR#

En esta parte se hace una introducción a la termografía infrarroja así como un estudio del estado del arte en torno a la misma, como base para formular los objetivos que se pretenden alcanzar y las razones que los motivan. Se finaliza estableciendo la estructura que se seguirá en este documento de tesis.

Capítulos:

- 1. Introducción*
- 2. Estado del arte de la termografía infrarroja*

Capítulo 1

Introducción

La obtención de “mapas” de temperatura de objetos en base a la captura y procesado de las radiaciones infrarrojas emitidas como consecuencia de su “estado térmico” se conoce como Termografía Infrarroja. Para ello, se utilizan cámaras dotadas de la óptica y paneles o “arrays” de detectores infrarrojos así como de la consiguiente electrónica y software para el adecuado tratamiento de la información.

Dado que a través de la distribución de temperatura de un objeto y/o de su evolución en el tiempo se puede obtener, sin contacto alguno, información valiosa del estado físico y/o estructural del objeto, la Termografía Infrarroja resulta ser una poderosa técnica para la Evaluación No Destructiva.

A continuación se efectúa una breve introducción a la Termografía Infrarroja y a los conceptos claves para su entendimiento.

1 Introducción

Como punto de partida se podría decir, a grandes rasgos, que la materia, la energía, el espacio y el tiempo son las bases de todo lo que existe. Sin querer entrar en discusiones sobre la existencia de universos paralelos y “agujeros de gusano”, todo podría simplificarse con estos cuatro términos:¹

“Sin tiempo, sin espacio. Sin materia o energía. Este es el principio del universo y no hay nada – ni siquiera un punto, ni siquiera un vacío. Fuera de esta nada se alza una agitación – un remolino, un chasquido, un algo inconcebiblemente pequeño. Y con ese algo, como parte de él, tiempo, espacio y otras maravillas llegan espontáneamente a su existencia. La tapa de la caja cósmica de Pandora ha comenzado a levantarse y de su interior se derraman todas las maravillas de la creación.”

1.1 Energía térmica, calor y temperatura

La materia está compuesta de átomos y moléculas y la energía hace que los átomos y las moléculas estén en constante movimiento: rotando alrededor de sí mismas, vibrando o chocándose unas con otras. El movimiento y, en su caso desplazamiento, de los átomos y moléculas crea una forma de energía llamada energía térmica, que está presente en todo tipo de materia. Incluso en los vacíos más fríos de espacio hay materia que posee energía, muy pequeña pero medible. Por lo tanto, una característica de la materia está relacionada con esa energía; hablaremos entonces de su *temperatura*.

El *calor* es la energía térmica total en una sustancia o cuerpo, por otro lado su temperatura es una medida de la energía térmica media. La temperatura no es energía sino una medida de ella, es una medida del calor o energía térmica de las partículas en una sustancia. Mientras que el calor depende de la velocidad de las partículas, de su número, de su tamaño y de su tipo, la temperatura no depende del tamaño, del número o del tipo de las mismas². Ambos términos resultan medibles y esta medida acaba siendo de gran importancia para multitud de procesos. Sin embargo, por simplificación y comodidad, la temperatura se erige, entre ambos conceptos, como el término más usado.

Tal es la importancia de la temperatura que se ha definido como una de las siete magnitudes fundamentales del sistema Internacional de Unidades, SI. Su unidad, el Kelvin (K) se ha establecido mediante la elección de un valor para la temperatura termodinámica (absoluta) de un estado de la materia bien definido, universal y reproducible, que se define como “la fracción 1/273,16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua”³. La temperatura está

¹ Traducción libre de parte del preludio del libro de David Darling “Deep Time: The Journey of a Particle from the Moment of Creation to the Death of the Universe and Beyond”, 1989.

² Esta concepción y diferenciación de los términos de calor y temperatura no apareció hasta los escritos de Joseph Black (1728-1799), quien distinguió entre la cantidad (caloría) y la intensidad (temperatura) del calor.

³ Uno de los primeros intentos para hacer un estándar de temperaturas ocurrió alrededor de AD 170, cuando Galeno, en sus notas médicas, propone un estándar de temperatura "neutral" completando cantidades iguales para la ebullición del agua y el hielo.

muy presente en el mundo con enorme influencia en fenómenos naturales, en procesos industriales, en laboratorios, en la medicina, etc.... y hace que su medición y control sea muy frecuente en dichos campos. Hay muy pocas propiedades de materiales que no cambian con la temperatura y consecuentemente un alto porcentaje de métodos de ensayo involucran la medición de esta magnitud. Además, la metrología de temperatura o termometría caracteriza la materia en función de su comportamiento térmico diferenciando perfectamente los comportamientos comunes de los anómalos. Por ejemplo, el hecho de tener una temperatura corporal diferente a la habitual puede relacionarse con una etapa de enfermedad⁴. El encontrar una zona caliente en una pieza mecánica puede indicar abrasión o fricción en esa zona. Éstos son algunos de los numerosos ejemplos que nos permiten relacionar un gradiente de temperatura con la existencia de defectos o anomalías en los materiales.

1.2 Física del calor

Dentro de la *termología*⁵, la transferencia de calor se puede definir como la ciencia cuyo objetivo es predecir la cesión de energía que se produce entre medios materiales como consecuencia de las diferencias de temperatura. Siempre que exista una diferencia de temperaturas en un cuerpo o entre cuerpos, debe ocurrir una transferencia de calor. La transferencia de calor es un proceso complejo que, para analizarlo fenomenológicamente, se puede descomponer en tres mecanismos: *conducción*, *convección* y *radiación*. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

La conducción térmica se establece cuando se crea un gradiente térmico en un medio estacionario, que puede ser un sólido o un fluido, y, en este caso, se entiende que la transferencia de energía ocurre a través del mismo medio o entre diferentes medios. En el caso de la convección, la transferencia de energía se establece entre diferentes medios, donde al menos uno de éstos está en movimiento, generalmente un sólido y un fluido o dos fluidos con diferentes propiedades térmicas, cuyas temperaturas en la superficie de contacto son diferentes. Dado que todo cuerpo con temperatura diferente del cero absoluto emite energía en forma de ondas electromagnéticas, que a temperatura ambiente se concentran en la región infrarroja, el tercer modo de transferencia de calor mencionado se denomina radiación infrarroja.

Numerosos autores recogen los fundamentos y los detalles de la transferencia de calor o la termodinámica. Basten, en el anexo A, unos detalles más concretos de cada mecanismo de transferencia, invitando al lector a la consulta de obras como [Incropera, 1999], [Sigalés, 2003] o cualquier otra referencia bibliográfica perteneciente a este campo de la Física.

⁴ Ya en tiempos antiguos, dentro de la filosofía china se consideró que la salud, como todo lo que existe en el universo, está vinculada a la armonía del cuerpo y del espíritu (el *yin* y el *yang*). Se establecía una clasificación en función de la temperatura del tipo de enfermedad padecida, el exceso de “*yin*” conduce a enfermedades agudas, febriles, secas, mientras que el exceso de “*yang*” lleva a enfermedades crónicas, frías o húmedas.

⁵ Termología: Parte de la Física que trata de todos los fenómenos en los que interviene el calor.

La disponibilidad de sofisticados métodos numéricos que simulen la transferencia de calor no ha disminuido, sin embargo, la necesidad de medir y observar de forma cuantitativa y cualitativa la misma. Sigue siendo necesario el proceso experimental que permita el desarrollo de un entendimiento fenomenológico de los procesos involucrados además de una validación de los modelos que se emplean. Es por ello que sigue tratándose de un campo en expansión y de aplicación en numerosos nuevos *nichos* como por ejemplo el control y mantenimiento, evaluación y prueba tanto de procesos como de materiales donde el calor y temperatura son fundamentales.

1.3 Métodos ópticos para la medida de la transferencia de calor y de la temperatura

Como se ha invitado a reflexionar en los apartados anteriores, la medida de temperatura resulta de gran interés en multitud de procesos (químicos, ambientales, médicos, mecánicos,...) y así se puede constatar simplemente realizando una investigación relativa a la amplia historia de la *termometría*⁶. Se han desarrollado numerosos dispositivos y sistemas de medida de temperatura desde siglos antes de Cristo hasta nuestros días e, igualmente, se han pretendido regular o estandarizar las medidas mediante escalas termométricas muy diferentes con el objetivo de conseguir mayor repetitividad y consenso en su uso.

Por lo general, los equipos de medida de temperatura (*termómetros* y *termoscopios*, también conocidos como termómetros diferenciales) se basan en la variación térmica registrada en materiales al entrar en contacto con el cuerpo bajo inspección. Realmente, la construcción de estos instrumentos conlleva una caracterización previa de los materiales o sustancias utilizados, siendo los más indicados aquellos con un comportamiento térmico más regular; la manera más regular es la forma de variación linealmente proporcional.

Siguiendo las leyes de la Termodinámica, al poner en contacto dos cuerpos, el calor (energía) fluye desde el cuerpo con mayor temperatura al de menor temperatura hasta que ambos cuerpos alcancen el equilibrio térmico. El uso de termómetros y termoscopios trata, entonces, de una medida indirecta en la que la conducción es el principal mecanismo de transferencia de calor. Pero, ¿es siempre necesario el contacto entre los dos cuerpos? ¿Podría medirse una temperatura sin contacto entre ellos? Usar *técnicas sin contacto* podría resultar de gran interés ya que el objeto puede estar en movimiento o estar tan caliente que degradara el termómetro de contacto.

La respuesta a la anterior pregunta pasa por la medida de la radiación que todo cuerpo emite como consecuencia de tener una temperatura. El mecanismo de transferencia de calor llamado radiación permite la estimación de la temperatura de los cuerpos de forma remota, sin contacto. Esto resulta muy beneficioso al contribuir a que los métodos basados en este mecanismo no sean invasivos o intrusivos. De esta forma, surgen los *métodos ópticos*⁷.

⁶ Termometría: Parte de la Termología que trata la medición de temperaturas.

⁷ Métodos ópticos: Técnicas cuyo fundamento comporta la interrelación entre la energía electromagnética y la materia. En general se asigna también a estos métodos el nombre global de

Los métodos ópticos son, inherentemente, no intrusivos y de aplicación sin contacto. Representan métodos de gran sensibilidad, fiabilidad y rapidez que no alteran, por lo general, la muestra cuando ésta es inspeccionada. La mayoría de estos métodos se basan en principios físicos conocidos desde hace siglos y pueden ser clasificados de acuerdo a cuatro principios básicos: radiación térmica, esparcimiento de la luz, interacción con la materia y métodos relacionados con cambios en el índice de refracción, entre las que destacan aquellas basadas en métodos interferométricos y las que utilizan la deflexión de la luz [Ambrosini, 2006]. Otra clasificación frecuente divide las técnicas ópticas de acuerdo con la región espectral que interacciona con la materia. Así, se denomina a la espectroscopia como de rayos X, ultravioleta lejano, ultravioleta cercano y visible, infrarrojo cercano y medio, infrarrojo lejano, microondas y radiofrecuencia.

El reciente desarrollo y comercialización de láseres, cámaras y sistemas de procesamiento de datos soportados por un software apropiado ha permitido un renacimiento de estas técnicas y extendido sus posibilidades al análisis cuantitativo de los datos. Entre las técnicas de medición ópticas (metrología óptica) más usadas para termometría se encuentran la *pirometría* y la *termografía*. La pirometría⁸ es un método de medida de temperaturas muy elevadas sin contacto que se basa en una medida de la radiación térmica emitida desde el objeto. Sin embargo, la limitación de su uso responde al conocimiento del valor de emisividad espectral de la superficie, uno de los parámetros de la ecuación de Planck que debe previamente ser conocido, o se debe suponer, antes que la temperatura real pueda ser calculada. En la práctica, las condiciones reales de la superficie pueden no ser conocidas, o pueden estar cambiando debido a oxidación u otros recubrimientos, o la emisividad puede variar con la temperatura del objeto mismo. Esta limitación llega a solventarse usando pirómetros con láser o pirómetros de múltiples longitudes de onda (*dual-band o multi-wavelength pyrometers*).

Por otro lado, la Termografía Infrarroja (TI) es la técnica de producir una imagen visible consecuencia de la luz infrarroja invisible (para el ojo humano) emitida por objetos de acuerdo a su condición térmica [Astarita, 2006]. Su origen se remonta a principios del siglo XIX gracias a los experimentos de W. Herschel (1738-1822)⁹, pero ha sido en los años sesenta (década 1960-1979) cuando se ha intentado aplicar a la medida de la transferencia de calor [Carlomagno, 1989].

espectroscopia. Los efectos que provoca la materia sobre la radiación son de varios tipos: absorción de esta última, su emisión por parte de la materia en estados excitados, cambio en su trayectoria o en sus planos de vibración.

⁸ Derivado de la raíz griega *pyro-* que significa fuego.

Los pirómetros de radiación se clasifican de acuerdo a su principio de medición en pirómetros de radiación parcial o pirómetros ópticos y pirómetros de radiación total. Los pirómetros ópticos determinan la temperatura de una superficie en base a la ley de radiación de Planck considerando un valor de longitud de onda de la radiación emitida por la superficie mientras que los de radiación total son los que miden la temperatura captando toda o una gran parte de la radiación emitida por el cuerpo en base a la ley de Stefan-Boltzmann.

⁹ En 1800 Herschel investigó el poder de calor de los rayos del espectro solar descubriendo que la temperatura del termómetro subía cuando cambiaba del violeta al rojo e incluso más allá del rojo, en una parte donde no había luz aparente. Sus resultados fueron publicados en las *Philosophical*

¿Pirometría o Termografía? ¿Cuál de estas dos técnicas utilizar? Para dilucidar alguna de las dudas planteadas con esta pregunta se invita a la lectura del siguiente apartado.

El poder de la imagen

De nuestros sentidos, la vista es sin duda el más desarrollado y el más perfecto. Nuestra memoria es capaz de almacenar cantidad de imágenes y el cerebro es particularmente eficaz procesándolas. Las imágenes visuales proporcionan a través del ojo, información sobre el color, la forma, la distancia, posición y movimiento de los objetos. Una gran cantidad de información es, por lo tanto, contenida en una única imagen que, como bien recoge el refranero español, vale más que mil palabras.

De la misma forma, el uso de imágenes permite inspeccionar áreas en lugar de tener medidas puntuales. Representan, igualmente, un mayor conocimiento en la medida de procesos que exhiben una alta variabilidad espacial, tales como la temperatura o la transferencia de calor. La mayor parte de los sensores térmicos (termopares, termorresistores, pirómetros, calorímetros,...) sólo permiten una medida puntual (o promediada en el espacio) por lo que limitan la información ofrecida de forma unidimensional (la transferencia de calor que miden o recogen se asume que es perpendicular a la superficie del sensor). Es así como, con el desarrollo de la Termografía Infrarroja, ésta se ha convertido en una de las herramientas más valiosas de diagnóstico, evaluación y prueba. Esta técnica genera imágenes infrarrojas, llamadas *termogramas*, o fotografías del "calor" que emiten los objetos, en las cuales se puede medir su temperatura. Al estar basada en imágenes, representa un sistema de medida bidimensional. Además, tratando sus datos con algoritmos y procesados de imágenes apropiados y relacionados con la modelización de los mecanismos de transferencia del calor en sólidos, la termografía llega a ofrecer información tridimensional de los mismos. Esto último se desarrollará en un capítulo posterior.

1.4 Motivación

En la actualidad no se discute que la calidad es un factor prioritario en la gestión de cualquier empresa o producto. Los precios de los productos se hacen cada vez menos relevantes y factores como la calidad son elementos de decisión. Pero, ¿qué se entiende por calidad? Es un término muy heterogéneo que implica valor, excelencia o superioridad, o simplemente el cumplimiento de una condición o requisito y es aplicable tanto a materiales, a procesos como a productos.

Como ya se ha mencionado, la medida de temperatura o de la transferencia de calor resulta crítica en multitud de procesos y puede, a la vez, ser utilizada para caracterizar materiales, componentes o estructuras. Así, la medición exacta y precisa de temperaturas o gradientes de las mismas es de gran importancia para toda una serie de procesos técnicos en los que se logran los resultados deseados sólo si es posible mantener ciertas temperaturas o

Transactions of the Royal Society of London. Herschel encontró que los rayos calóricos también obedecían las mismas leyes de refracción y reflexión que la luz visible.

mantenerlas dentro de unos márgenes determinados. Entre dichos procesos se encuentran, por ejemplo, los relacionados con la fusión de los metales, los de la cocción de la cerámica, la fusión del vidrio y la sinterización de la porcelana. Así mismo, la transferencia del calor en un objeto puede mostrarnos características propias del mismo o incluso ofrecer información acerca de su estado interior.

Considerando lo anterior, en este trabajo se presentarán contribuciones basadas en técnicas termográficas para la evaluación y prueba de materiales y procesos de forma no destructiva ni invasiva. Pero, ¿cómo se mide la temperatura? Los sensores de temperatura usados en inspección térmica pueden separarse en dos categorías: sensores de temperatura de contacto y sensores de temperatura sin contacto. Los *sensores sin contacto* se basan mayoritariamente en sensores *infrarrojos*¹⁰ y miden la radiación electromagnética generada en la superficie de los objetos. Existen dispositivos de imagen infrarroja, escáneres de mano portátiles, sistemas interferométricos, radiómetros y pirómetros. Por otro lado, los sensores con contacto incluyen los dispositivos termoeléctricos (termopilas, termoacopladores y termistores¹¹) y aquellos que utilizan recubrimientos de materiales sensibles a la temperatura (cristales líquidos, pinturas sensibles al calor, componentes termocromáticos, papeles sensibles al calor, fósforos o componentes orgánicos que emiten luz visible cuando son excitados por luz ultravioleta...). Pero, ¿cuáles son mejores? A pesar de poder llegar a ser más precisos y exactos en su medida de la temperatura, los sensores de contacto poseen algunas limitaciones como su inconveniencia para medir temperaturas en objetos que puedan estar en movimiento, que sean frágiles, inaccesibles, pequeños o estar tan calientes que degraden cualquier sensor al contacto o, simplemente, pueden influir o perturbar el objeto de medida.

Por ello es deseable el uso de técnicas sin contacto de inspección térmica basadas en infrarrojos como ensayos no destructivos aptos para la evaluación de calidades en procesos y productos manufacturados. Pero, ¿qué se utiliza, pirometría o termografía? Utilizando la termografía infrarroja obtenemos el beneficio de capturar imágenes (mayor contenido de información) manteniendo la rapidez, fiabilidad y seguridad en las medidas. Los sistemas infrarrojos portátiles convierten instantáneamente la radiación térmica en mapas térmicos visibles que pueden ser visionados en equipos de video convencional o en formato digital para poder realizar un análisis cuantitativo de temperatura.

¿Para qué sirve la termografía? ¿En qué tipo de inspecciones puede ser aplicada? Las aplicaciones en las que este tipo de ensayo no destructivo resulta de gran utilidad son muy variadas. Muchos equipos que conducen o generan calor o frío son candidatos para ser inspeccionados con estos métodos termográficos. Igualmente lo son ensayos, procesos y componentes en los que la temperatura sea una magnitud a controlar. Así ocurre en la identificación de

¹⁰ Todo cuerpo a una temperatura superior al cero absoluto emite radiación, predominantemente en la región infrarroja.

¹¹ Los termoacopladores o termopares son uniones de dos metales diferentes que al calentarse ofrecen una diferencia de potencial entre ellos. Los termopilas son agrupaciones de termoacopladores que incrementan la salida eléctrica. Los termoresistores son semiconductores que cambian su resistencia en función de la temperatura a la que se encuentran.

fugas, intrusiones de líquidos y delaminaciones, desencolados o burbujas de aire en materiales de nueva generación (existe un amplio uso de pegamentos para crear estructuras o añadir cubiertas protectoras). Sólo por mencionar algún ejemplo, al posibilitar la detección de anomalías que muy a menudo resultan ser invisibles a simple vista, la termografía permite detectar y desencadenar las pertinentes acciones correctoras.

Trabajando en el control de procesos de la industria siderúrgica y la evaluación de componentes manufacturados, se pueden emplear distintos métodos en la inspección térmica según el tipo de anomalías que se esperan tratar. Así, se pueden dividir los métodos de inspección tratados en *métodos estacionarios* y *métodos transitorios* según sean los utilizados para detectar anomalías donde las temperaturas cambian muy poco con el tiempo (por lo general, aquellos objetos o procesos térmicamente activos) o bien lo hagan durante el propio tiempo de medida, respectivamente [Balageas, 1987], [Cielo, 1987]. En el primero de los casos, los tipos de anomalías producen grandes diferencias térmicas, y deben ser de gran tamaño y cercanos a la superficie para que las imágenes o datos de temperatura resultantes sean entonces fácilmente interpretados. Existe un mayor reto en el caso de objetos térmicamente pasivos ya que lo esencial en este caso es conseguir un calentamiento y enfriamiento uniformes y controlar esos gradientes para mantener las diferencias térmicas causadas por los defectos. En el segundo de los casos, cuando las diferencias de temperatura pueden producirse para luego desaparecer, múltiples medidas en el tiempo permiten una interpretación cuantitativa de los sucesos. Destacar que la fuente de excitación debe ser desconectada para eliminar su interferencia con las medidas. *Entender cómo afrontar una inspección resulta imprescindible para la exitosa evaluación del material, proceso o componente.*

Cada caso particular requiere de un conocimiento a priori del proceso o componente, convirtiéndose este conocimiento en algo indispensable si se quiere realizar un análisis *cuantitativo*. Los *mecanismos de transferencia de calor* de conducción, radiación y convección son afectados por las características del material (calor específico, densidad, conductividad térmica, difusividad térmica, coeficiente de convección, emisividad...)¹² y la inspección térmica depende de las variaciones locales de dichas características para establecer una diferencia de temperaturas medible. Es por ello que *resulta necesario conocer lo mejor posible los mecanismos de transferencia de calor para poder obtener la mayor sensibilidad en el análisis de secuencias térmicas.*

¹² Calor específico, c : es la cantidad de calor necesaria para aumentar la temperatura en una unidad por unidad de masa de un material, sin cambio de estado

Densidad, ρ : cantidad de masa contenida en un determinado volumen.

Conductividad térmica, k : es la cantidad de calor que fluye en una dirección cuando existe una diferencia de temperatura del material en esa dirección, capacidad de los materiales para dejar pasar el calor.

Difusividad térmica, α : es la velocidad a la cual el calor fluye de una región de alta temperatura hacia sus alrededores más fríos

Factor de convección, h : es una medida de cuán eficiente el calor es intercambiado entre una superficie y un gas o líquido en movimiento

Emisividad, ε : indica la eficiencia de una superficie como radiador (o absorbedor) de radiación electromagnética. Es función de otras variables, incluyendo color y rugosidad de la superficie.

Además, el *tratamiento digital de la imagen* puede ser usado para mejorar la *calidad de las imágenes* térmicas. El filtrado espacial puede suavizar los datos eliminando el ruido de alta frecuencia causado por los dispositivos de calentamiento externos. Por ejemplo, se reemplaza el valor de un píxel por un promediado de sus cuatro píxeles vecinos más cercanos [Potet, 1987]. Técnicas de promediado de la señal pueden también utilizarse para reducir el ruido de las imágenes si las mismas no varían demasiado rápidamente con el tiempo. Las funciones sustractivas tanto en el dominio espacial como en el temporal eliminan patrones de no uniformidades de las fuentes de calor, de emisividades superficiales o variaciones de temperatura no relacionadas con anomalías (efectos convectivos o conductivos). *Teniendo la medida de temperatura lo más fiable, precisa y exacta posible, las tareas de análisis cuantitativo resultan más precisas y acertadas.*

1.5 Estructura del documento

La presente memoria se divide en cinco partes, como se aprecia en la siguiente tabla:

Tabla 1-1. Estructura del documento de tesis.

MEMORIA DE LA TESIS	Parte 1	Capítulo 1	Introducción
		Capítulo 2	Estado del arte de la termografía infrarroja
	Parte 2	Capítulo 3	Detectabilidad de defectos subsuperficiales en sistemas de termografía activa con escasa digitalización
		Capítulo 4	Automatización del procesado de imágenes
	Parte 3	Capítulo 5	Conclusiones y líneas futuras
	Parte 4	Capítulo 6	Bibliografía
		Anexo A	Principios fundamentales de la Física del calor
		Anexo B	Conocimientos y técnicas claves en termografía infrarroja
		Anexo C	Aplicaciones industriales de la termografía infrarroja
		Anexo D	Técnicas de procesado de imágenes en secuencias termográficas
		Anexo E	Algoritmos de detección de patrones lineales
Parte 5	Anexo F	Equipamiento utilizado	
	Summary	Summary	

La primera parte comprende los preliminares de la obra con la Introducción (capítulo 1) y Estado del arte de la termografía infrarroja (capítulo 2) donde se describe la técnica y se realiza un repaso de las contribuciones más recientes en aspectos tales como la actualidad de los sistemas *hardware*, los desarrollos *software* y las aplicaciones *ad-hoc*.

La segunda parte engloba las contribuciones más destacadas con una comparativa de sistemas de termografía activa pulsada en términos de Detectabilidad de defectos subsuperficiales (capítulo 3) y la Automatización de la detección y evaluación de defectos internos (capítulo 4) donde se procura

automatizar los procesos de decisión en cuanto a la presencia de defectos subsuperficiales en distintos materiales.

La tercera parte reúne las Conclusiones finales, se apunta a las Líneas abiertas y se establecen los Futuros trabajos a seguir, fruto de estos estudios.

La cuarta parte está constituida por las referencias bibliográficas y los anexos. Los anexos, seis, recogen otros aspectos de interés útiles en la comprensión de la obra, características técnicas de los equipamientos empleados y algorítmicas usadas.

La quinta parte refiere un resumen amplio en inglés para la consecución de la mención de Doctorado Europeo a la que aspira el autor.

Además, para finalizar se indican ciertas consideraciones preliminares que afectan a la presentación de este documento:

- La terminología usada para identificar las anomalías que se detectan en la inspección térmica puede ocasionar indeterminaciones. La detección y localización de discontinuidades en la transferencia de calor tiene como origen anomalías que pueden ser provocadas o no y que pueden considerarse o no defectos. Se detectan exactamente de la misma forma las perforaciones, inclusiones de materiales, desencolados y discontinuidades de materiales quedando relacionados al término “defectos” si resultan perjudiciales o no deseados.
- Para facilitar el seguimiento de la lectura, las referencias bibliográficas se incluyen organizadas por capítulos u ordenadas alfabéticamente y en el formato [*primer apellido del primer autor, año de publicación*]. En el caso de coincidencia de referencias, se asignan letras al final de las mismas para diferenciarlas. En las referencias propias del autor, la distinción se realiza mencionando el lugar de publicación de la contribución bien con el acrónimo del congreso bien con el identificador de la revista.
- En el último de los capítulos se muestra un listado de las contribuciones a las que ha dado lugar este trabajo ordenadas por colaboraciones/proyectos en los que se ha participado.

Capítulo 2

Estado del arte de la termografía infrarroja

La medida distribuida de la temperatura y su distribución en el tiempo permite deducir la distribución del calor y sus flujos. A través de ello, sin contacto, de forma no invasiva y no destructiva, se pueden predecir estados del material o de su estructura. Para que la inspección térmica provea resultados útiles se han de lograr diferencias de temperatura (contrastes térmicos) entre el rasgo de interés y su entorno, mediante un equipo de medida apropiado y conocimiento para interpretar y analizar adecuadamente los resultados.

En este capítulo se muestran las tendencias en este campo a través de un análisis de publicaciones que recogen las últimas contribuciones científicas y catálogos de productos comerciales actualmente en el mercado. De la misma forma, se revisa el estado del conocimiento y de la técnica de la termografía infrarroja con el fin de detectar carencias que sugieran la formulación de los objetivos a perseguir con este trabajo doctoral. Los resultados más significativos, que se recogerán en los capítulos siguientes, han dado lugar a las contribuciones que se incorporan al estado del arte de la termografía infrarroja.

2 Estado del arte de la termografía infrarroja

La temperatura es un parámetro clave en procesos de fabricación, en evaluación de materiales y dispositivos, entre otros. Su medida de forma remota (sin contacto) evita la alteración del objeto de medida, del ambiente que lo rodea o del valor de la medida. La consecución de imágenes térmicas posibilita la observación bidimensional de los mecanismos de transferencia de calor otorgando mayor cantidad de información, en comparación con las técnicas de medida meramente puntuales. El hecho de añadir la posibilidad de un análisis y un registro temporal de esas imágenes, conduce a un mayor control y conocimiento de los procesos bajo inspección. Por ello, la termografía infrarroja (TI) se posiciona como una alternativa seria, fiable y precisa a otras técnicas de ensayos no destructivos (END) como la Radiología Industrial (RX), Ultrasonidos (UT), Corrientes Inducidas (PE), Partículas Magnéticas (PM), Líquidos Penetrantes (LP), Inspección Visual (IV), Emisiones Acústicas (EA) o Ensayo de Fugas (PF) [ASNT, 2001]. En el anexo B se recogen unas “pinceladas” sobre los conocimientos y técnicas claves en TI.

Cada técnica END tiene sus propias ventajas e inconvenientes. Las propias de la termografía infrarroja se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 2-1. Cuadro resumen de las ventajas e inconvenientes más representativos en el uso de la termografía infrarroja como ensayo no destructivo.

Ventajas	<ul style="list-style-type: none">• Rapidez en la inspección• Sin contacto• Seguridad (no involucra radiaciones dañinas)• Resultados relativamente fáciles de interpretar (formato imagen)• Amplio rango de aplicaciones, posee nichos de aplicación exclusivos
Inconvenientes	<ul style="list-style-type: none">• Dificultad de uniformidad de excitaciones en algunas medidas (termografía activa)• Efectos de mecanismos de transferencia de calor muy variados (convección, radiación y conducción)• Capacidad limitada de la detección de defectos subsuperficiales• Disponibilidad para inspeccionar especímenes de cierto espesor• Problemas de emisividad

2.1 Situación y tendencias

La mejora y sofisticación de las cámaras de infrarrojo, el incremento del poder de computación y la mejora del software (algoritmos, modelados) involucrado en el análisis de las secuencias termográficas animan a la búsqueda de nuevos nichos

de aplicación de la termografía y a una sustancial mejora de los resultados en las aplicaciones ya conocidas. No hay más que observar el auge de conferencias y publicaciones que tratan estos tópicos y reflexionar sobre las comunicaciones que en estos medios aparecen.

Conferencias internacionales como Thermosense en América (anual, en el año 2006 ha celebrado su XXVIII encuentro internacional) y QIRT (Quantitative Infrared Thermography, conferencia bianual que celebra durante el 2006 su octava edición) en Europa, son específicas en los usos científicos, industriales y generales de la medida de temperatura y la obtención de imagen mediante infrarrojos. Conferencias igualmente internacionales pero con sentido más amplio al ser enfocadas hacia los ensayos no destructivos (END) y donde la inspección térmica tiene una clara continuidad son: NDT Conference (Annual British Conference on Non-Destructive Testing que durante el 2006 celebra su 45º encuentro anual) y la ECNDT (European Conference on Non-Destructive Testing cada cuatro años alcanzando su novena edición en 2006) en Europa y la, también cada cuatro años, conferencia mundial WCNDT (World Conference on NDT en su séptima edición en el 2004). También existen grupos de trabajo como el Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Materials (IWASPNDE) cada cuatro años en Québec, Canadá, (en su quinta edición en 2005), y el Advanced Infrared Technology and Applications (AITA) bianual en Italia (en su octava edición en 2005). Todos estos encuentros son ejemplos claros de la relevancia y difusión adquirida por la termografía infrarroja en el mundo.

Publicaciones avaladas por las distintas asociaciones (ASNT-Materials Evaluation, BINDT-Insight, QIRT-Qirt Journal, IEEE, SPIE,...), aquellas propias del campo de la caracterización de materiales (Research Nondestructive Evaluation, NDT&E Internacional, entre otras), y algunas propias de la óptica o de la física aplicada (Infrared Physics and Technology, Optical Engineering, Advance Physics, Optics and Laser Technologies,...) presentan en sus números los avances de una técnica con marcado carácter experimental y abarcando el desarrollo de dispositivos, los ensayos no destructivos, la metrología, la biomedicina, aplicaciones ambientales, la ingeniería civil, el modelado térmico,...

Kurt Ammer realiza anualmente un escrutinio de la literatura en diferentes publicaciones que contiene alguna de las siguientes palabras: "thermography", "thermometry", "temperature measurements" o "thermology" [Ammer, 2003-2006]. Utiliza para ello diversas bases de datos (Embase, Medline, Science Direct, HighWire,...) y, como resultado, destaca que la palabra "thermography" (con sus variantes "infrared imaging" y "thermal imaging") es la que más veces aparece referenciada.

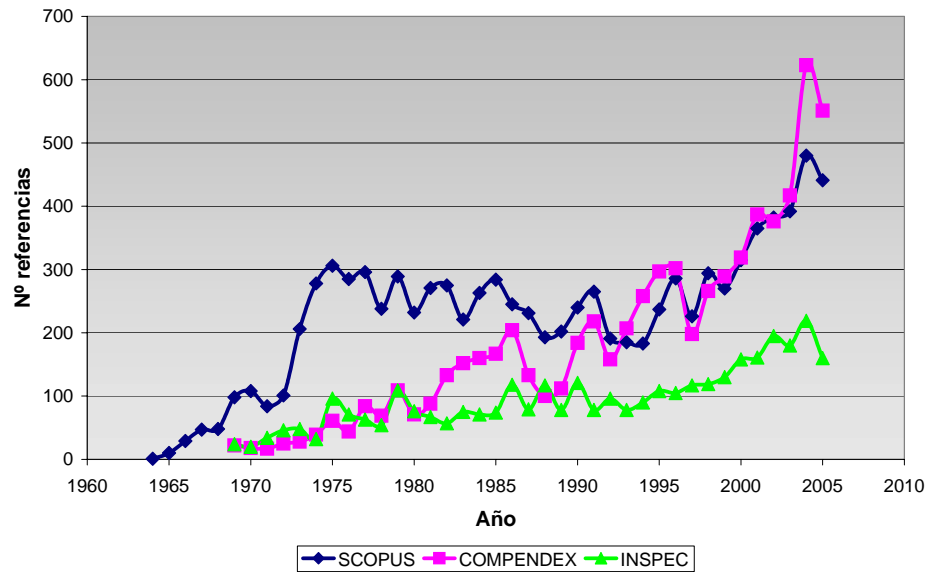


Figura 2-1. Aparición de los términos “thermograph*”, “thermal imaging” o “infrared testing” en distintas bases de datos de recursos bibliográficos, organizadas por años.

En bases de datos mucho más completas, Scopus¹³, Inspec y Compendex¹⁴ se puede observar la evolución del número de veces que aparecen los términos “thermograph*”, “thermal imaging” o “infrared testing”. La Figura 2-1 recoge el número de incidencias, organizadas por años, observando claramente una tendencia alcista en cuanto a las publicaciones en las que aparece, en la descripción de la referencia bibliográfica, alguno de los términos previamente comentados.

Resulta a su vez interesante el gráfico recogido en la Figura 2-2 y originado tras la consulta de las bases Inspec y Compendex. En él se representa la contribución por países a las muestras de las publicaciones anteriores. Sin duda alguna, Estados Unidos de América (USA) aparece como el país que más contribuciones a este campo está aportando desde 1969 con un 30.4% del total de 7304 publicaciones. El segundo país es el Reino Unido con un 11.6% siendo el tercero y el cuarto China y Alemania con un 4.4% y un 4.1%, respectivamente. Estos cuatro países representan más del 50% de las publicaciones en este campo. España se encuentra en un discreto 21^{er} lugar representando un aporte del 0.5% detrás de países como Grecia, Bélgica, Holanda y Suecia con mucha menor población y que también forman parte de la Unión Europea.

¹³ Scopus es una novedosa herramienta de navegación que engloba la mayor colección de resúmenes, referencias e índices de literatura científica, técnica y médica (CTM) a nivel mundial y con referencias citadas de más de 14.000 publicaciones procedentes de más de 4.000 editores internacionales desde el año 1966. Las búsquedas se realizan simultáneamente en la base de datos Scopus y en el motor de búsqueda de información científica en Internet Scirus.

<http://www.scopus.com/scopus/home.url>

¹⁴ Inspec y Compendex son bases de datos bibliográficas en línea, producidas por Engineering Information, con información científica y tecnológica de todas las ramas de la Ingeniería: civil, industrial, mecánica, química, ambiental, minera, metalúrgica, energética, de materiales, naval, nuclear, informática. Contienen más de 8 millones de referencias y resúmenes de artículos de 5.000 revistas especializadas, conferencias e informes técnicos. Disponible desde 1969.

<http://www.engineeringvillage2.org>

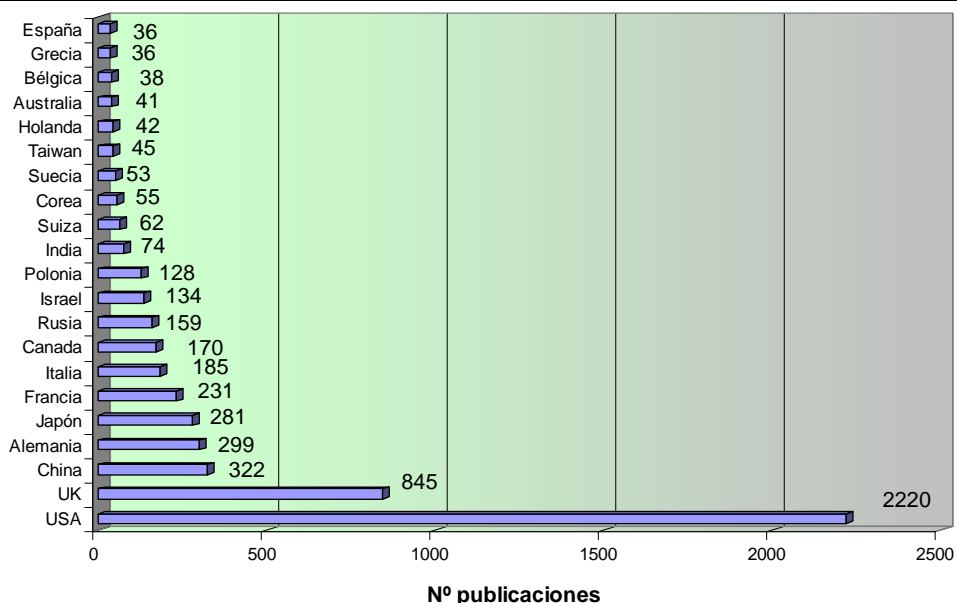


Figura 2-2. Contribuciones por países que aparecen recogidas en las bases de datos Inspec y Compendex desde 1969 y que contienen alguno de los siguientes términos: “thermograph*”, “thermal imaging” o “infrared testing”. Se observa un claro predominio del mundo anglosajón en este campo de la ciencia. España aporta un 0.5%, contribución sensiblemente inferior a la de otros de países de su entorno.

Realizando la consulta por editores, se destacan cuatro grandes entidades que auspician diferentes publicaciones: el American Institute of Physics (AIP), The International Society for Optical Engineering (SPIE), la editorial Elsevier y el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Valiéndose de los distintos accesos online que permiten consultar el texto completo de cada una de ellas¹⁵, se realiza una comparativa entre los distintos editores de las publicaciones en los últimos cinco años (periodo enero de 2000-junio de 2006). En la Figura 2-3 se observa que la tendencia es similar (hay que tener en cuenta que el tiempo invertido por cada editorial en el proceso de revisión de pares varía de unas publicaciones a otras) y que Elsevier ha logrado una primacía en los últimos años, anteriormente ostentada por el SPIE. Esto se debe al incremento del número de publicaciones de esta editorial, la agilización de los procesos de envío, corrección y aceptación (la mayor parte hacen uso de tecnologías web) y la gratuidad de muchos de sus contenidos.

En un intento de clasificar las contribuciones que aparecen en los distintos medios, se toma como referencia la subdivisión en sesiones que presentan los congresos más específicos. Igualmente, la rapidez de publicación y reconocimiento científico de los congresos hace que sean una buena muestra del estado del arte. Así, en base a lo programado en los congresos Thermosense y QIRT, se muestra a continuación la Figura 2-4, que refleja el número de ponencias y posters presentados en cada sesión de los últimos encuentros.

¹⁵ AIP: <http://scitation.aip.org/>; SPIE: <http://spiedl.org/>; Elsevier: <http://www.sciencedirect.com/>; IEEE: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/guesthome.jsp>

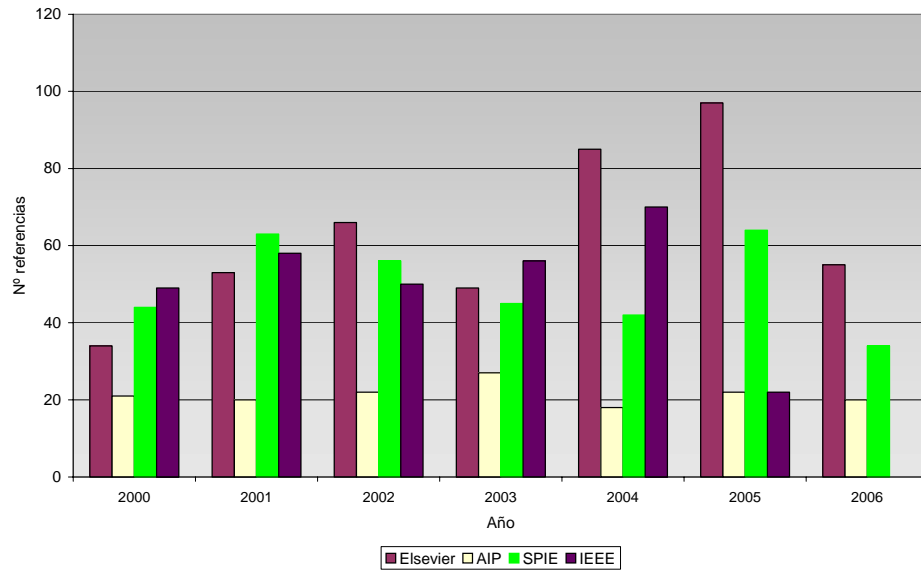


Figura 2-3. Contribuciones en los últimos cinco años en el campo de la termografía e inspección térmica recogidas por cada editor de entre los cuatro seleccionados, esto es, el American Institute of Physics (AIP), The International Society for Optical Engineering (SPIE), la editorial Elsevier y el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). La consulta en la base de datos del IEEE sólo ha sido posible realizarla hasta mediados de 2005.

Sobre una muestra de 377 artículos, se observa que los ensayos no destructivos engloban el mayor número de ellos siendo seguidos por el área de la mecánica de sólidos y fluidos. Las sesiones de ensayos no destructivos abarcan la evaluación de especímenes (principalmente compuestos reforzados de fibra de carbono, CFRP, de gran uso en industrias como la aeroespacial), el estudio de daños por impactos, fugas de gases o líquidos e inspecciones varias, como el caso de los transbordadores espaciales¹⁶. Las contribuciones en la física mecánica incluyen estudios de propiedades termofísicas, modelados del flujo de calor, semiconductores, combustión y llama resultando el congreso QIRT el principal agrupador de estas publicaciones.

El campo de la radiometría y la metrología sigue siendo de especial relevancia atendiendo a la calibración de equipos, estudios de emisividades, desarrollo de nuevas fuentes de calibración,... El control de procesos y aplicaciones industriales en las ramas de desarrollo de automóviles, de la generación de electricidad, deformación en máquinas, hornos, alimentación,... representa el 11% de todas las muestras. La evaluación de materiales e infraestructuras propias de la ingeniería civil continúa aportando conocimiento científico como se observa en las diferentes sesiones, siendo el control de la humedad y de las características del cemento los pilares de tal área.

¹⁶ Tras el desastre del transbordador espacial Columbia en su última misión en febrero de 2003, el Columbia Accident Investigation Board (CAIB) hizo una serie de recomendaciones a NASA con la intención de prevenir en el futuro accidentes similares. La primera de las recomendaciones es la investigación de métodos que certifiquen la integridad de los materiales siendo la termografía el primero de los métodos de ensayos no destructivos seleccionados por la NASA.

El CAIB concluyó que una pieza de espuma aislante se desprendió, en el despegue, del tanque externo de combustible y golpeó el ala izquierda del transbordador causando daños en un panel de carbono reforzado (reinforced carbon-carbon, RCC). Esto hizo que el aire, sobrecalentado por la fricción, fundiera la estructura de aluminio del ala y así el Columbia acabara desintegrándose.

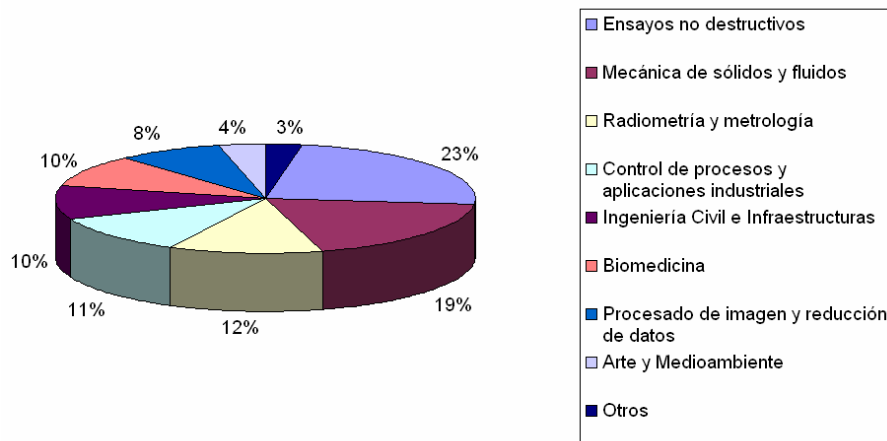


Figura 2-4. Porcentaje de las contribuciones distribuidas por materias como resumen de las últimas conferencias específicas (Thermosense 2004, 2005 y 2006 y OIRT 2004 y 2005). Se observa que el mayor número de publicaciones hace referencia al uso de la termografía infrarroja para ensayos no destructivos.

Destacar que en el 2004, las aplicaciones de la inspección térmica a la detección de la “gripe aviar” (SARS) hicieron que el campo biomédico en estas conferencias acumulara un gran número de contribuciones (en Thermosense 2004, se tuvieron dos sesiones especiales en relación con esta enfermedad que causó muertes en todo el mundo). El estudio con termografía de tejidos humanos, detección de cáncer de mama y los efectos de la acupuntura presentan avances cualitativos y cuantitativos en el campo de la medicina.

El procesado de imagen mantiene su importancia al recoger contribuciones que pueden ser aplicadas a todas las demás facetas que tenemos en consideración. Nuevos procesados para el análisis cuantitativo de las secuencias termográficas y un interés por las técnicas de reducción de los datos para su mejor tratamiento y almacenamiento, acaparan este apartado. También se ha detectado, aunque en menor medida con un 4% de la muestra, la aplicación de la termografía infrarroja a nichos tan específicos como el arte (restauración y diagnóstico de pinturas, esculturas y monumentos) o el medioambiente (agricultura, incendios forestales,...). Finalmente, el resto de los artículos revisados se agrupan en un único apartado (otros) que recoge, entre otras, aplicaciones específicas como la EMIR (medida de patrones de radiación de antenas), sistemas de vigilancia o de inspección térmica.

2.1.1 Hardware

Existe una gran variedad de dispositivos relacionados con la termografía infrarroja que han encontrado su desarrollo comercial en los últimos años. Siendo una tecnología eminentemente militar a finales del siglo XX, se ha convertido en la actualidad en una herramienta de uso común en multitud de actividades civiles.

Se han diseñado nuevos sistemas de captura de imágenes siendo cada vez más pequeños, más compactos y ligeros, de mayores velocidades, sin olvidar una sustancial reducción de su precio. Se comercializan tecnologías que proporcionan sensores sin necesidad de enfriamiento, logrando, además, matrices de detectores

de mayor tamaño, menor ruido, mejorando la resolución espacial (utilizando nuevos sistemas de lentes) y, adicionalmente, ofreciendo los datos de temperatura digitalizados.

Antes de estos avances, la cámara de infrarrojos básica consistía en un detector con un sistema electromecánico de barrido de elevado ruido y limitado rendimiento. En la actualidad existe una amplia variedad de detectores (cuánticos, bolómetros, etc...) con interfaces digitales de 14 bits, bajo nivel de ruido (menor de 20 mK), tamaños de imagen de 640x382 píxeles, y frecuencias de muestreo de hasta decenas de KHz. Las figuras de mérito utilizadas en su comparación han cambiado como consecuencia de la evolución de los métodos de caracterización y la mejora tecnológica en los respectivos parámetros. Los parámetros actualmente aceptados son: la responsividad, la potencia equivalente de ruido (NEP), la detectividad normalizada, la diferencia de temperatura equivalente al ruido (NETD), la mínima diferencia de temperatura resoluble (MRTD) y la respuesta en tiempo. Otras, menos usadas, son: la linealidad de la respuesta, el acoplo entre elementos del detector, el rango dinámico y la función transferencia de modulación (MTF) [Datskos, 2003]. En el Anexo F se encuentra una breve introducción descriptiva de algunos modelos de cámaras usadas en inspecciones termográficas.

Para el uso en termografía activa, también existe una evolución natural en los sistemas de excitación mejorándose, con el tiempo, la energía y la calidad de los pulsos de luz obtenidos con los flashes¹⁷, aumentando la variedad de frecuencias generadas con ultrasonidos y creando láseres sintonizables en longitudes de onda más acordes con las necesidades (infrarrojo cercano).

Finalmente, la capacidad de computación aumenta de forma exponencial permitiendo el almacenamiento de un mayor número de secuencias termográficas, el aumento de la velocidad de adquisición de las mismas y el procesado más eficiente y rápido de algoritmos cada vez más complejos.

2.1.2 Software

El software utilizado en termografía infrarroja agrupa un gran número de funciones definidas para el análisis y diagnóstico de las imágenes, la grabación, el almacenamiento y la recuperación de las secuencias termográficas, la comparación de imágenes y su catalogación y, en la actualidad, las funciones propias del análisis cuantitativo de las medidas térmicas¹⁸.

El procesado más básico incluye rutinas para restar las evoluciones de ciertos píxeles a toda la imagen (muy útil si el píxel en cuestión corresponde con una zona libre de defectos, contrastes térmicos). El uso de transformadas aplicadas a toda la secuencia de datos requiere de los algoritmos más eficientes que, en conjunción con el hardware de computación, ofrezcan los resultados del

¹⁷ Consultar catálogos de fabricantes y representantes, por ejemplo Cromalite S.L.: www.cromalite.com

¹⁸ Suele incluir lecturas de la temperatura en un punto, creación de perfiles X e Y, diferentes paletas de colores, desplazamiento y rotación de imágenes, magnificación, análisis de área con histogramas, promediado de imágenes, filtrados y grabación en distintos formatos.

análisis de la forma más clara y rápida posible. No se debe olvidar que se trabaja con tratamiento de imágenes, por lo que el procesado se ve fuertemente implicado por los tamaños de imagen utilizados haciendo necesaria la inclusión de técnicas de reducción de datos bien para la operación con los mismos bien para su almacenamiento. Así se habla de secuencias termográficas sintetizadas [Shepard, 2001] o de descomposiciones de imágenes en componentes principales (PCT, *principal component thermography*) [Rajic, 2002].

Para optimizar la efectividad del software, el operador de un sistema de termografía infrarroja debe estar familiarizado con las técnicas de tratamiento de imagen básicas. Una vez que la señal infrarroja ha sido preprocesada y transformada en temperatura por el software incluido normalmente en el sistema de captura, se realiza a posteriori un tratamiento de imágenes, bien sea para fines de detección de defectos internos o bien para su caracterización (determinación de propiedades térmicas, tamaño y profundidad). Este procesado puede ser tan sencillo como realizar el contraste absoluto [Maldague, 2001] de los valores temporales de temperatura entre dos zonas, asegurando que una de ellas sea libre de defectos (*soundarea*)¹⁹. Una vez detectados los defectos, es igualmente posible estimar la forma y el tamaño de los mismos tras la aplicación de un algoritmo de extracción de bordes o segmentación, p.ej. Sobel, Roberts, Canny, etc.

Finalmente, mediante el uso de métodos de inversión de la profundidad, se puede establecer la profundidad de los defectos haciendo uso tanto de los datos en el dominio temporal como en el frecuencial, si aplicamos la Transformada de Fourier discreta (TFD). 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 [Ibarra, 2005]. En el dominio frecuencial, los métodos de inversión, tanto en termografía lock-in [Meola, 2004] como en termografía pulsada de fase [Ibarra, 2004], se basan en una relación directa entre la profundidad z y la difusividad térmica μ [Ibarra, 2005].

Cualquier software evolucionará por tanto incluyendo cada vez más y más funciones que permitan simplificar, tratar y analizar las secuencias de termogramas. Igualmente incluirá funciones propias del procesado de imagen así como funciones explícitas de uso exclusivo en termografía. Cada fabricante integra su propio software en los sistemas termográficos, al menos con las funciones más comunes relegando las más explícitas a las propias de cada usuario. Como ejemplos de software propietario se dispone de MOSAIQ™, que puede ser implementado en los sistemas de inspección EchoTherm® o ThermoScope® de Thermal Wave Imaging, Inc. (TWI), el MPS 5.0 de las cámaras Thermosensorik, el software ThermaCam de Flir Systems o el ThermoGRAM de Thermoteknix Systems Ltd. Como ejemplo de otro software, desarrollado explícitamente por laboratorios para uso genérico, se tiene ThermoFit o

¹⁹ La identificación de esta zona suele ser una tarea poco factible además de que su elección puede condicionar los resultados, haciendo interesante la idea de evitar la identificación de la *soundarea* mediante procesado. Esto se consigue con el conocimiento a priori de la transferencia del calor en el material y de la excitación que se realice.

ThermoBuild²⁰. Finalmente, también se dispone de código libre creado en Matlab como Ir-View creado por Matthieu Klein y descargable desde su página web²¹.

A pesar de todo este desarrollo software, la inspección visual por parte de un operador sigue siendo la forma más comúnmente adoptada para la decisión final en la detección de defectos. Diferentes organizaciones alrededor del mundo otorgan certificaciones de personal (inspector termográfico nivel I, II y III) [ASNT, 2001]. La automatización de cualquier parte del proceso evita en mayor o menor medida la incertidumbre propia de la subjetividad humana, considerándose un éxito en caso de simplificar y, a la vez, ejecutar correctamente el proceso de decisión.

2.2 Problemáticas detectadas

De la revisión del estado del arte se desprenden problemáticas que a continuación son detalladas.

2.2.1 Efecto de la digitalización en las señales termográficas

La digitalización de las imágenes en una cámara termográfica produce limitaciones en la medida de la temperatura. Una señal de vídeo analógica es digitalizada de dos formas con una capturadora digital: con un muestreo espacial y con una conversión analógico-digital, convirtiendo valores de voltaje a un nivel digital de una escala de grises.

La frecuencia de muestreo determina el número de píxeles obtenidos en cada línea horizontal. Como máximo, debiera coincidir con la resolución horizontal de la cámara pero, aún así, probablemente, se produzca una degradación de la señal del píxel al no solaparse perfectamente con los elementos originales que compongan el detector. Por otro lado, la conversión analógico-digital tiene una resolución de bit por canal que suele estar comprendida entre los 8 y los 14 bits. Por ejemplo, con 8 bits se pueden obtener 256 niveles en una escala monocromática mientras que podrían obtenerse más de 16 millones de colores si la digitalización de 8 bits se realiza sobre los tres canales cromáticos (rojo, verde y azul).

El efecto de la digitalización no sólo tiene razón de ser por el uso de cámaras con salida de vídeo analógica. Las cámaras infrarrojas analógicas han quedado anticuadas. Sobre la década de los ochenta apareció otra tecnología que revolucionó el mundo de la medida de temperatura sin contacto. Se desarrollaron los sensores de efecto térmico o también llamados *microbolómetros*.

²⁰ Diseñados por el IR Thermography Laboratory de Tomsk Polytechnic University, Rusia.

ThermoBuild procesa imágenes infrarrojas en termografía de edificación (programa diseñado sólo para MatLabTM 6.5 y cámaras ThermaCAMTM IR) obteniéndose imágenes de resistencia térmica de paredes, imágenes de pérdidas de calor,...

ThermoFit es un software avanzado de procesado de secuencias termográficas que incluye la transformación de Fourier, algoritmos de interpolación, análisis derivativo, caracterización de defectos, tomografía térmica y tratamientos estadísticos. Está especialmente indicado para el procesado de secuencias de termografía pulsada reconociendo los formatos típicos de imágenes capturadas y tratando los datos tanto en amplitud como en el dominio temporal y de frecuencia (fase).

²¹ <http://m-klein.com>

Tabla 2-2. Resolución térmica para un rango dinámico de 200°C en función del número de bits utilizados en la digitalización de las señales.

Número de bits	Número de niveles	Resolución Térmica
8	256	0,78125
9	512	0,390625
10	1024	0,1953125
11	2048	0,09765625
12	4096	0,04882813
13	8192	0,02441406
14	16384	0,01220703
15	32768	0,00610352
16	65536	0,00305176

Éstos utilizan el efecto térmico de la radiación infrarroja para variar las condiciones eléctricas de una microresistencia, compuesta por un material semiconductor, y así obtener una señal proporcional a la potencia del infrarrojo recibido que es convertida a formato digital en el propio sensor. Esta tecnología no necesita ningún tipo de refrigeración y por tanto reduce de manera asombrosa el tamaño y el peso de los sistemas termográficos. Sin embargo, debido a ser una tecnología en desarrollo, la miniaturización de cámaras con microbolómetros, que salió a la luz en 2003, hacía que la salida digital de algunas de las cámaras fuera de 8 bits aún en el 2004. Hoy en día, se tienen casi las mismas prestaciones en cámaras de tamaño normal que en cámaras miniatura, con resoluciones térmicas de 14 bits.

La digitalización está directamente relacionada con el rango dinámico de temperaturas que el sistema es capaz de medir. La diferencia de temperaturas entre el fondo de la imagen y el objetivo es, por lo general, lo que marca el rango dinámico, el margen entre la máxima y mínima temperaturas de la escena. Dependiendo de esos valores, el número de niveles otorgados en la digitalización establece la máxima resolución térmica que puede alcanzarse, como puede observarse en la Tabla 2-2.

Suponiendo que el máximo rango de temperaturas a medir es de 200°C y se usa un digitalizador de 8 bits, la resolución térmica resultaría ser de $200^{\circ}\text{C}/256 = 0.78^{\circ}\text{C}$. Modificando la ganancia de los amplificadores de los detectores se puede sensibilizar el sistema de medida a señales más débiles aumentando, por tanto, la resolución térmica. Si la ganancia fuera incrementada, de forma que se obtiene el mismo rango de tensiones de salida para un rango de temperaturas de entrada de 100°C, la resolución térmica sería 0.39°C . Hay que destacar que esta resolución térmica puede ser más restrictiva que la sensibilidad térmica (NEDT). Cuando el NEDT es la limitación térmica, un incremento de la profundidad de bit de los datos no aporta más información. Por ejemplo si el NEDT es de 0.1°C , no existe razón aparente para utilizar más de 11 bits en la digitalización.

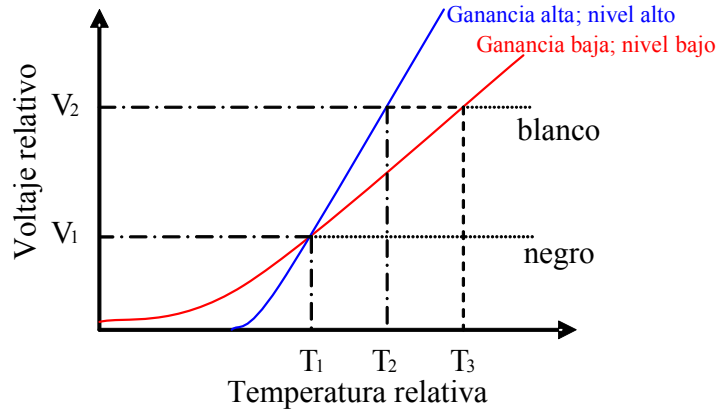


Figura 2-5. Variaciones de la ganancia y del nivel del offset en detectores. El rango dinámico es $T_2 - T_1$ o $T_3 - T_1$ según el conjunto de valores establecidos para la ganancia y el nivel.

Visto de otra manera, con un sistema de 8 bits, cambiar constantemente la ganancia y el nivel para poder expandir el rango dinámico de medida conlleva una pérdida de resolución térmica. En algunos casos, las cámaras están provistas de un control automático de ganancia y del nivel de offset (nivel que ajusta la temperatura mínima en el rango). La selección de la ganancia y el nivel de offset en el detector limitan así el rango dinámico de la medida pero, el ruido, que equivale a un número concreto de niveles digitales, también se modifica. La Figura 2-5 ilustra dos ejemplos con diferente ganancia y nivel de offset.

El rango dinámico de entrada es $T_2 - T_1$ produciendo una salida entre V_2 y V_1 . Para el segundo conjunto de valores de ganancia y nivel, la misma salida sería producida con un rango dinámico $T_3 - T_1$. En ambos casos el valor alto de salida V_2 correspondería al color blanco mientras que el valor bajo V_1 lo haría al negro en una escala monocromática. Esta diferencia de tensiones sería digitalizada correspondiendo el ruido del sistema a un nivel digital determinado diferente para cada conjunto de valores de ganancia y nivel.

Conocido el equivalente del ruido en niveles digitales, se obtiene el rango dinámico capaz de medirse:

$$Rango\ dinámico = 2^{\text{número bits digitalización}} \left(\frac{NEDT}{\text{número niveles}_{NEDT}} \right) \quad \text{ec. 2.1}$$

Por ejemplo, considerando que una medida del NEDT precisa de un sistema es de 0.1°C y que equivale a 4 niveles digitales, con un sistema de digitalización de 8 bits el rango dinámico es de 6.4°C . Sin embargo, con un sistema de 16 bits, el rango dinámico sería de 1638°C .

Se observa que, según se incrementa el número de bits en la digitalización, el rango dinámico de medida se amplía y que la resolución térmica se incrementa. Igualmente, utilizando un número de bits reducido puede inducirse una limitación en la resolución térmica del sistema, *condición que podría ser más restrictiva que la sensibilidad térmica*.

2.2.2 Automatización del procesado de imágenes

Aún con el desarrollo software, la intervención de un operador sigue siendo muy necesaria y una fuente de incertidumbres. En este sentido, se considera un éxito el automatizar cualquier parte del proceso.

Como se desprende de la lectura del anexo D, diferentes problemáticas deben ser resueltas para obtener una automatización en el proceso de detección de defectos en una secuencia termográfica. En dicho anexo se clasifican los procedimientos de tratamiento de las secuencias termográficas en preprocesado, procesado y postprocesado según se refieran a un acondicionamiento, un modelado directo o la extracción de información de la secuencia, respectivamente.

En el caso de las técnicas empleadas para el acondicionamiento de la secuencia (regeneración de píxeles defectuosos (badpixels), corrección de ruido aleatorio, corrección de Patrones Fijos de Ruido (FPN), corrección del encuadre (vignetting), calibración en temperatura y filtrado de señales), la automatización es provista con el uso de matrices que corrigen el valor de cada píxel en cada imagen mediante factores que engloban todo lo anterior en un proceso de normalización y calibración. Es posible estimar la forma y el tamaño de un defecto (postprocesado) al examinar un termograma o fasegrama, tras la aplicación de un algoritmo de extracción de bordes, p.ej. Sobel, Roberts, Canny, etc y el uso del *concepto de detectabilidad*. Para ello, se implementan funciones propias de tratamiento de imagen de las que disponen numerosas aplicaciones.

Los procesados presentados requieren una obligatoria intervención humana para la exitosa inspección y evaluación de los materiales. A grandes rasgos, los métodos de contraste térmico [Maldague, 2001] presentan la imperiosa necesidad de la elección de un área libre de defectos, *soundarea*, para comparar las evoluciones y establecer los pertinentes contrastes. El método de la normalización [Zalameda, 2003] requiere la selección de la secuencia de termogramas sobre la que realizar la operación que da nombre a este método. La termografía pulsada de fase (pulsed phase thermography, PPT) [Maldague, 1996] [Ibarra, 2005] necesita de una optimización de la resolución frecuencial a partir del correcto muestreado y truncamiento de la secuencia. La termografía de componentes principales (principal component thermography, PCT) [Rajic, 2002] descompone la evolución de la temperatura superficial en función de un conjunto de matrices ortogonales de forma automatizada pero la referencia temporal, indispensable para la estimación de profundidades de los defectos, se pierde. El método de primera y segunda derivadas [Martin, 2003] requieren de una precisa sincronización entre la excitación pulsada y la captura de las diferentes imágenes para no afectar al cálculo de las derivadas. Los métodos basados en Laplace y Wavelet [Ibarra, 2006], al igual que la PPT, necesitan el previo y apropiado establecimiento de las escalas temporales para poder realizar la correcta transformación.

De la reflexión a la que se invita con la lectura del anexo D, se extrae la necesidad de focalizar los esfuerzos de automatización en los procesados que modelan el comportamiento o evolución térmica de los cuerpos. Igualmente, la

estimación de la profundidad o las características térmicas de los defectos se basan en la precisión de esos modelados. Así, cualquier forma de reducción de la subjetividad humana innata a dicho proceso, además de aumentar la eficiencia y velocidad de las inspecciones, conlleva una valoración más repetitiva y exacta de ciertas cuantificaciones objeto de las inspecciones. La automatización de los procesados viene también caracterizada por su consumo computacional y su tiempo de respuesta. El objetivo no es otro que proveer de herramientas software lo más precisas, repetitivas, rápidas y fiables posibles para ser incorporadas en los procesos de inspección termográfica.

2.3 Conclusiones y objetivos

Hoy en día, el control de la calidad de los productos se ha convertido en uno de los principales hitos de la industria. Debido a la competitividad reinante, se exige de cada producto que éste tenga una calidad determinada como valor añadido a sus características intrínsecas. Diferentes técnicas han sido empleadas para la evaluación de productos y control de procesos de producción a lo largo del tiempo resultando ser un proceso evolutivo que va llegando a todas las ramificaciones del tejido productivo. La inspección visual y diferentes técnicas de ensayos no destructivos (END) han sido explotadas para controlar la calidad de los productos con la gran ventaja de tratarse de métodos que no conllevan el deterioro o rotura de los especímenes bajo prueba. Sin embargo, se sigue investigando en estas áreas de conocimiento como consecuencia del interés de su aplicación a la evaluación de cualquier tipo de materiales.

Basada en la propagación de las ondas térmicas y el análisis de su atenuación en los materiales, la *termografía* permite realizar un control bidimensional de la temperatura y, haciendo uso de modelados de la transferencia del calor, es capaz de estimar la presencia de defectos internos, su profundidad y propiedades. Estrictamente hablando, *termografía* es una técnica de contacto para obtener la distribución de la temperatura en la superficie de un material mientras que la *termografía infrarroja* no implica tal contacto. Por razones de eficiencia en la inspección (movimiento del objeto bajo inspección, rapidez de la medida, tamaños,...), la termografía infrarroja adquiere mayores ventajas frente a la termografía tradicional y de ahí el interés por su aplicabilidad.

Como se desprende del análisis del estado del arte presentado, existen numerosas investigaciones que describen trabajos basados en el uso de la termografía infrarroja para un gran número de aplicaciones como predicción y prevención, aplicaciones médicas, industria del automóvil, edificación, mecánica de sólidos y líquidos, arte, etc.... Se trata de un campo en expansión de aplicación y conocimiento dominado principalmente por el mundo anglosajón. Igualmente, su evolución responde a cualquier innovación o mejora tecnológica en campos diversos como la óptica, la electrónica y la computación.

El abaratamiento de los equipos, la reducción de tamaño y la mejora de prestaciones hacen que la aplicación de la termografía infrarroja disponga de una instrumentación fiable y precisa. Las unidades de sus figuras de mérito incitan al control de más procesos donde la transferencia de calor denote una característica

particular, traspasando incluso los umbrales de detectabilidad de las medidas. Con el apoyo de potente hardware, desarrollado o en vías de ser desarrollado, el software ofrece un modelado fiel de las situaciones que ayuda a la interpretación de los resultados. La importancia del software en termografía infrarroja es más patente cuando se pretende realizar un análisis cuantitativo de las secuencias termográficas.

Se dispone de recursos hardware precisos y fiables, pero el software aún requiere ser usado por personal técnico cualificado²² con suficientes conocimientos de áreas tan dispares como la mecánica de sólidos, la transferencia de calor, la óptica, la electrónica, la programación de software y el procesado de señales e imágenes. Resulta de gran interés, por ello es el primordial objetivo en esta obra, la automatización de los procesos involucrados en el análisis de secuencia termográficas. Toda automatización lleva consigo la reducción de la subjetividad inherente al sistema que aporta ese personal, aumentando la efectividad de esta técnica de ensayos no destructivos.

Tras el estudio del estado de la situación se han detectado problemáticas aún no resueltas. Con el fin de contribuir a su resolución, se procede a formular los objetivos principales que se pretenden alcanzar con la realización de este trabajo doctoral:

- Demostrar qué combinaciones de técnicas permiten obtener mejoras en la detección de defectos subsuperficiales mediante equipos con limitada digitalización.
- Automatizar, en la medida de lo posible, los procesados necesarios en la inspección térmica por TI evitando la subjetividad humana en las decisiones acerca de la presencia de una anomalía.

Para cubrir lagunas existentes y evidenciadas en los apartados anteriores, los objetivos parciales de este trabajo de tesis son:

1. Por una parte, teniendo en cuenta las tendencias observadas en el campo de la termografía infrarroja, la mejora de las prestaciones hardware, su versatilidad y su diversidad incitan a la presentación de comparativas entre sistemas de diferente naturaleza y al estudio de diferentes configuraciones. Así, se plantea:
 - a. Establecer la técnica, con las herramientas y parámetros necesarios, que permita comparaciones precisas y significativas entre sistemas termográficos de diferente composición hardware.
 - b. Analizar los beneficios del uso de termografía de pulso largo para solventar carencias en las prestaciones de las cámaras termográficas.
2. Por otro lado, el desarrollo de software está disfrutando de una eclosión con motivo de la incorporación de gran potencial computacional a los sistemas termográficos. Nuevas funciones que ayudan a la interpretación de las secuencias termográficas son desarrolladas con especial orientación

²² La experiencia del técnico/operador es una parte crítica de la inspección térmica. Existen cualificaciones personales y estándares de certificación (nivel I, II y III) [ASNT, 2001].

a la idea de permitir una medida cuantitativa en la detección de defectos subsuperficiales en los materiales. Pero se han observado problemáticas que atañen a la objetividad de las medidas. Por ello, se plantea:

- a. Acordar apropiadamente el tiempo de adquisición.
- b. Ajustar las tendencias lineales en el modelado de la variación de la temperatura superficial bajo excitaciones pulsadas.

Para los objetivos formulados se realizan los trabajos pertinentes y, como consecuencia de los mismos, surgen las contribuciones que se presentan y discuten en los capítulos 3 (objetivos 1.a y 1.b) y 4 (objetivos 2.a y 2.b).

PARTE 2#

CONTRIBUCIONES#

En esta parte se recogen los resultados obtenidos de los trabajos de investigación realizados para alcanzar los objetivos formulados en el capítulo anterior. Las diferentes contribuciones aportadas en el campo de la termografía infrarroja para la evaluación y prueba no destructiva en materiales y procesos industriales se incluyen en los siguientes capítulos.

Capítulos:

3. Detectabilidad de defectos subsuperficiales en sistemas de termografía activa con escasa digitalización

4. Automatización del procesado de imágenes

Capítulo 3

Detectabilidad de defectos subsuperficiales en sistemas de termografía activa con escasa digitalización

El presente capítulo recoge una revisión del concepto de detectabilidad de los defectos subsuperficiales en los ensayos no destructivos aplicando termografía infrarroja. Se presentan los factores que influyen negativamente en ella, así como las formas de evitar los errores que provocan, y las técnicas que ayudan a incrementarla. Se determina cómo el uso de fuentes externas apropiadas puede mejorar la detectabilidad usando equipos de medida con una digitalización de una escasa profundidad de bits. Se realiza una propuesta del criterio de detectabilidad que permite determinar el sistema de termografía activa óptimo para una aplicación específica. Los resultados de los estudios han sido validados experimentalmente habiendo dado lugar a publicaciones internacionales.

3 Detectabilidad de defectos subsuperficiales en sistemas de termografía activa con escasa digitalización

3.1 Introducción

Cuando alguien está enfermo, uno de los primeros pasos en su atención consiste en el control de su temperatura como síntoma de un desorden metabólico. Esta temperatura se toma en ciertos lugares establecidos como referencia convirtiéndose así en un procedimiento de termografía²³ pasiva puntual. Pero esta medida de temperatura superficial refleja la existencia de anomalías tanto superficiales como internas. Si las lecturas térmicas de la superficie del cuerpo se realizaran sobre varios puntos simultáneamente en una línea o en un plano, la termografía daría mayor información del interior del material ya que el conocimiento de los fenómenos de transferencia del calor en el objeto bajo inspección contribuye a un mayor control y evaluación de su interior.

Numerosas aplicaciones de control de procesos o inspección y evaluación de materiales requieren de un conocimiento cualitativo y cuantitativo de lo que ocurre en el interior. El proceso de conducción aporta la información necesaria siendo imprescindible en muchos casos un modelado de las situaciones de prueba. La complejidad del modelado de la transferencia de calor necesita un conocimiento a priori que simplifique, en la medida de lo posible, su formulación. De forma ilustrativa, dos ejemplos de las aplicaciones mencionadas son: el control del enfriamiento de coladas de plomo en la creación de contenedores nucleares y la detección de las estructuras de sujeción de paneles de materiales compuestos en la industria aeroespacial (una propia de termografía pasiva y otra de termografía activa, respectivamente)²⁴.

La precisión y resolución espacial de las medidas termográficas resultan cruciales para obtener la información relativa al interior del material. Los errores y el ruido deben ser minimizados al máximo. De igual forma, los efectos de una escasa digitalización de las imágenes en una cámara termográfica (que pueden ser más restrictivos que la sensibilidad térmica) deben ser compensados. El

²³ La termografía infrarroja no es un procedimiento nuevo. Los primeros experimentos se remontan al uso del *evaporígrafo* (*evaporograph*) en el siglo XIX, el cual absorbe con una lámina aceitosa la radiación emitida por una superficie de tal forma que el aceite que impregna dicha lámina se evapora en aquellos puntos que se corresponden con las áreas más calientes del cuerpo. La lámina corresponde así con un mapa de isotermas de la superficie inspeccionada. Sin embargo, no es hasta 1965 cuando una empresa sueca comercializa la primera cámara infrarroja (hasta entonces sólo eran conocidas en el campo militar) haciendo que la termografía infrarroja progrese y se consolide como una técnica de ensayos no destructivos.

²⁴ Francisco J. Madruga, Daniel A. González, Jesus M. Mirapeix, José M. López Higuera, "Application of infrared thermography to the fabrication process of nuclear fuel containers", *NDT&E International*, Vol. 38, n. 5, pag. 397- 401, 2005.

N. P. Avdelidis, D. P. Almond, "Through skin sensing assessment of aircraft structures using pulsed thermography", *NDT & E International*, Vol. 37, Issue 5, pag. 353-359, 2004.

Estos trabajos han motivado al autor el estudio de las mejoras de la detectabilidad en sistemas de termografía. Más detalles son ofrecidos en el Anexo C.

aporte extraordinario de energía de la termografía activa eleva la energía del pulso térmico incidente en un material lo que conlleva una gran ayuda en la detectabilidad de defectos internos con el incremento del contraste térmico producido en las anomalías.

3.2 Parámetros que definen la detectabilidad de defectos

Un sistema de inspección térmica captura la radiación proveniente de una escena, filtrándola espacialmente y focalizándola en un detector. El detector convierte las señales del dominio óptico en señales eléctricas analógicas que son posteriormente amplificadas, digitalizadas y procesadas para ser representadas en un monitor o almacenadas. Por lo tanto, el rendimiento del sistema de inspección depende de numerosos factores, siendo los más importantes la resolución espacial y la sensibilidad térmica que consiguen.

La detectabilidad de anomalías tanto superficiales como internas suele ser descrita atendiendo a dos términos: el tamaño mínimo detectable (*minimum detectable size*, MDS) y la diferencia de temperaturas equivalente al ruido (*noise equivalent temperature difference*, NETD). Cuando el objetivo presenta un tamaño superior al tamaño mínimo detectable se puede determinar la temperatura del espécimen a partir de la radiación emitida por él. Sin embargo, cuando el objetivo presenta un tamaño inferior al tamaño mínimo detectable, la forma del objeto no puede ser discernida ya que la energía del entorno también entra en el detector como ruido. Claramente, este factor depende de la óptica utilizada, el tamaño del píxel del detector y la distancia a la que se produce la medida. La diferencia de temperaturas equivalente de ruido se define como el cambio de temperatura tal que la relación señal a ruido del sistema termográfico sea la unidad. Depende, igualmente, del tamaño de píxel del detector y del número F^{25} de las ópticas. Sus valores están en torno a las centésimas de Kelvin.

La dependencia de un sistema de los dos parámetros anteriores lleva a la *mínima diferencia de temperaturas resoluble* (*minimum resolvable temperature difference*, MRTD) que caracteriza los detectores o sistemas de inspección térmica definiendo la diferencia de temperatura más pequeña que un operador es capaz de discernir en una escena que recoge un patrón de barras sobre un fondo uniforme. A frecuencias espaciales bajas, la sensibilidad térmica definida por el NETD es lo más importante mientras que para frecuencias espaciales altas el factor dominante es la resolución espacial. La MRTD combina ambos factores en un único concepto. Con valores rondando las décimas de grado, tiene en cuenta tanto los efectos espaciales de la óptica como los parámetros del detector a través de la *función transferencia de modulación* del sistema (*modulation transfer function*, MTF)²⁶ [Daniels, 2001]. Sin ser medidas absolutas de temperatura sino diferencias perceptibles relativas a un fondo determinado, simula la capacidad de un

²⁵ El número F, representa la relación focal de la lente o espejo correspondiente, esto es, la relación entre su distancia focal y su diámetro efectivo.

²⁶ Todo sistema puede caracterizarse por su respuesta impulsional o su transformada de Fourier. La función de transferencia de un sistema óptico posee entonces una parte real (la MTF) y una parte imaginaria (*la función transferencia de fase*).

observador para apreciar bajos contrastes entre el ruido de las imágenes, en definitiva la detectabilidad en sistemas de percepción visual.

3.2.1 Factores que influyen en la inexactitud de la medida termográfica

En un sistema termográfico, las imprecisiones en las medidas de temperatura pueden ser provocadas por errores en la evaluación de los parámetros que caracterizan la radiación infrarroja (base sobre la que se sustenta el sistema), por efecto del ruido inherente a todo sistema o por errores propios del aparato de medida (aberraciones en las lentes, respuestas de amplificación dependientes de la frecuencia, falta de focalización en el objetivo, refracciones de la apertura del iris, reflexiones internas en el equipo, difracción,...) [Inagaki, 2001]. Conocer sus orígenes y la forma de corregir sus efectos resulta esencial. A modo de ejemplo, existen errores en la medida cuando se miden objetos a temperatura cercana a la temperatura ambiente porque la energía radiada detectada puede verse influenciada en mayor medida por la energía reflejada proveniente del entorno. También afectan a la medida las variaciones de emisividad, reflexiones o la degradación del equipamiento tanto en su óptica como en su electrónica.

El término *ruido* involucra toda señal indeseada o espúrea en un sistema que genera un error en la medida afectando a su precisión, exactitud, repetitividad y resolución. Sus orígenes pueden ser muy variados clasificándose en aleatorio (no correlado) o correlado y sus efectos pueden ser aditivos o multiplicativos. Por lo general, el ruido aleatorio es de efecto aditivo, con origen en el sistema detector (ruido térmico o Johnson noise, ruido de fluctuación o flicker noise y ruido de disparo o shot noise) mientras que el ruido correlado (de patrón fijo, fixed noise) suele ser de efecto multiplicativo y con origen en las partes mecánica y óptica del sistema detector (encuadres, aberraciones de lentes, variaciones de sensibilidad entre detectores,...). Ambos tipos de ruido se reducen mediante procesado de imagen (ver Anexo D) efectuando promediados temporales y espaciales de las secuencias termográficas.

Los errores originados por un desacierto en la valoración de los parámetros de la transferencia de calor por radiación (básicamente los valores de las características de emisividad y reflectividad de la superficie de los materiales) requieren de técnicas específicas para su corrección. Del conocimiento del mecanismo de radiación se extrae la importancia de una alta emisividad (uniforme en todas las direcciones de radiación y longitudes de onda) y una baja reflectividad de la superficie de los materiales bajo inspección, ya que la potencia radiada captada por el sistema es directamente proporcional a la emisividad mientras que la reflectividad es su “complemento a la unidad” para una superficie opaca²⁷.

El efecto de dichos parámetros puede tratarse mediante software, siendo modificados puntualmente en el procesado de la imagen, o bien puede

²⁷ Para más detalles sobre los conceptos fundamentales de la radiación como mecanismo de transferencia de calor (ley de Planck, ley de Stefan-Boltzmann, concepto de cuerpo negro, emisividad, principio de conservación de la energía radiada, ...) se sugiere consultar publicaciones de este campo o de Física.

uniformarse haciendo que toda la superficie tenga el mismo valor en estas características. La modificación de la emisividad, por ejemplo, se logra mediante el recubrimiento de la superficie con una pintura de alta emisividad como sprays de color negro mate procurando un acabado uniforme (es erróneo pensar que sólo y todas las pinturas negras tienen alta emisividad, la pintura blanca de óxido de titanio tiene una emisividad de 0.94). La adecuación de la composición química de la pintura debe verificarse para que pueda ser eliminada fácilmente y no afecte al objeto bajo prueba (ensayo no destructivo). Otras alternativas son el uso de cintas adhesivas o modificar la superficie favoreciendo el proceso de oxidación o puliéndola, aunque no son opciones recomendadas por dejar secuelas en el material (pegamentos de las cintas y el óxido). Si aún así la superficie presenta variaciones importantes de emisividad (por ejemplo, como consecuencia de su porosidad y rugosidad) o no es posible modificarla (por ejemplo, superficies incandescentes²⁸ o inaccesibles), se pueden aplicar técnicas propias de la pirometría (termografía de doble banda, *dual band thermography* [Williams, 2006]) o la sustracción en el procesado de imágenes de una imagen de referencia, o imagen fría, que reduce los efectos de la emisividad y del fondo de la escena de inspección.

Todos estos errores en las medidas, aunque no eliminados, pueden ser minimizados mediante un proceso de calibración de los sistemas termográficos. El uso de fuentes de calibración de cuerpo negro o la medida de superficies con una temperatura controlada permite la corrección, con un preprocesado, de las imágenes capturadas.

3.2.2 Factores que contribuyen a la detectabilidad de defectos subsuperficiales

Básicamente, desprendido del apartado anterior, el control y uniformidad de la emisividad y reflectividad de la superficie permite una evaluación precisa de la temperatura superficial del objeto bajo inspección. Numerosos trabajos en el campo de la radiometría y de la pirometría han sido publicados para la inspección térmica remota, trabajando tanto en el desarrollo de nuevos transductores como en el desarrollo de optoelectrónicas hechas a medida. A modo de ejemplo ilustrativo, la medida precisa de la temperatura de una superficie posibilita el control de procesos metalúrgicos que afectan directamente a la calidad final del producto que manufacturan, como se desprende de la lectura del Anexo C.

Una vez “descartados” los orígenes de variaciones de emisividad y reflectividad, las posibles diferencias térmicas que se observan en la medida superficial son consecuencia de la presencia bien de anomalías o discontinuidades superficiales bien de reflejos de la presencia de anomalías subsuperficiales que, por conducción del calor, afectan a la temperatura en la superficie de forma localizada. La diferenciación de la causa es labor del operador que analiza y comprende las secuencias termográficas.

²⁸ Como recoge el proyecto SOTEPAC, el autor contribuye al desarrollo de un sensor de temperatura en coladas de acero basado en fibra óptica donde los efectos de la emisividad son evitados mediante la técnica pirométrica de doble banda. Para más información ver el Anexo C.

Gracias al conocimiento de la transferencia del calor en el material, se puede relacionar la variación de la temperatura superficial con la presencia de una anomalía interna (subsuperficial). Se pueden generar ondas térmicas apenas por debajo de la interfase de la muestra que se propagan hacia el interior del material atenuándose fuertemente. Actúan como cualquier otra onda, esto es, sufren reflexión ante cualquier interfaz subsuperficial como podría ser un defecto o un cambio de material. Las ondas reflejadas retornan hacia la superficie produciendo un comportamiento oscilante de su temperatura. Con el control o medida de la temperatura superficial de un material durante todo el proceso (generación de la onda térmica y su propagación hasta su desaparición), se pueden relacionar las variaciones detectadas con lo que esté ocurriendo dentro del espécimen. El modelado del fenómeno de la conducción del calor cobra entonces gran relevancia. De su análisis se desprenden las condiciones que deben procurarse para que la detectabilidad de los defectos subsuperficiales sea lo más elevada posible. Por una parte, las características de las anomalías influyen de forma determinante (su tamaño, profundidad y propiedades térmicas). Por otro lado, la detectabilidad de los defectos internos tiene una estrecha relación con la excitación externa a la que puede ser sometido un espécimen y que termina produciendo en él un frente de ondas térmico.

3.2.2.a Detectabilidad en las termografías activas pulsadas

Las fuentes de excitación externa más comunes se centran en el uso de energía radiante y, más concretamente, en rangos de longitudes de onda donde las radiaciones no tienen suficiente energía como para romper enlaces atómicos (radiación no ionizante). Para la realización de ensayos no destructivos la fuente más utilizada hace uso del efecto fototérmico. Cuando la luz es absorbida por un material, se producen efectos tales como la conversión de luz a calor, producción de gases (fotosíntesis), etc. Además, es posible liberar o transferir la misma energía de forma pulsada (de mayor o menor temporalidad) o de forma modulada. Esto da lugar, en el caso de la termografía activa, a la termografía *pulsada* (pulsed thermography), la termografía de *pulso largo* (long-pulse or step-heating thermography) y la termografía de *lazo cerrado* (lock-in thermography). En el Anexo B se hace una introducción a cada una de estas excitaciones.

De las expresiones analíticas de la conducción del calor en un sólido se desprende que, cuanto mayor es la energía incidente, mayor es el contraste térmico producido y, por tanto, mayor la detectabilidad. La transferencia de la misma cantidad de energía mediante pulsos instantáneos, pulsos largos o mediante ciclos (lock-in) presenta importantes diferencias.

Muchos autores han establecido comparativas entre las termografías de lazo cerrado, pulsada y de pulso largo. Principalmente se trata del análisis de la detectabilidad de determinados tipos de anomalías. Cada uno ha basado sus experiencias en diferentes especímenes, diferenciándose principalmente por su distribución de defectos e inhomogeneidades al igual que por su composición química. El uso de resinas *epoxy* y fibras de carbono ha sido ampliamente extendido, tanto por tratarse de materiales de importancia en industrias tales como la aeroespacial como por caracterizarse por bajas conductividades térmicas

permitiendo obtener suficiente contraste térmico en las pruebas y durante el tiempo suficiente para que los equipos de inspección no tengan que ser extremadamente rápidos.

En este apartado, por el interés que despiertan las inspecciones rápidas, sólo se comparan las termografías pulsadas. La termografía *lock-in* presenta un análisis realizado únicamente a la frecuencia de la excitación y en una situación estabilizada (régimen permanente o estacionario) por lo que resulta mucho más lenta que las termografías pulsadas. Cada ensayo es realizado para una frecuencia, estudiando una profundidad cada vez, lo que aumenta el tiempo de inspección. Así, en el análisis de un espécimen, varias experiencias deben realizarse para cubrir todo el espesor del mismo siendo el rango de profundidades estimado en μ , la longitud de difusión térmica, para las imágenes de amplitud y en 1.8μ para las imágenes de fase [Busse, 1979].

Las soluciones analíticas son de poca ayuda cuando simulan las condiciones reales de un ensayo donde los materiales son anisótropos y las discontinuidades presentan formas irregulares. Sin embargo, pueden ser buenas aproximaciones en otras circunstancias. Las discontinuidades que pueden ser analizadas analíticamente deben de ser grandes y alejadas de los bordes de la superficie bajo inspección ya que, de otra forma, la difusión lateral reduce el contraste térmico y el intervalo de tiempo en el que el defecto es visible. La difusión lateral es afectada por el tipo de material, la profundidad a la que se encuentra el defecto o discontinuidad y el tiempo que pasa desde que se produce la excitación. Además, como regla universal, se usa el cociente entre el radio de las discontinuidades y la profundidad para determinar si el defecto puede ser considerado como una discontinuidad de espesor finito o no.

Con el desarrollo de la computación, las técnicas numéricas han copado el análisis tridimensional de la transferencia del calor siendo ahora la estabilidad de la solución y los requerimientos de tiempos de simulación las restricciones que se deben ponderar. En este trabajo se utiliza el software ThermoCalc-6L (ThermoCalc-3D Pro) creado por el IR Thermography Laboratory de Tomsk Polytechnic University, Rusia, y que modela numéricamente en 3D defectos subsuperficiales en sólidos multicapa de formas rectangulares, con excitaciones arbitrarias que permiten patrones de calentamiento no uniformes.

Basado en un montaje de inspección termográfica típico de un espécimen compuesto de fibra de carbono con defectos internos como el mostrado en la Figura 3-1, en la Figura 3-2 se muestran algunos termogramas pertenecientes a la secuencia termográfica de una simulación con excitación pulsada de 0.1 segundos. En la Figura 3-3 el pulso es de 0.5 segundos. En ambos casos, los defectos considerados son taladros de distinta profundidad producidos en la parte posterior del objeto. Las imágenes recogen el *contraste absoluto* (diferencia absoluta térmica) entre la temperatura superficie del material sustrato y la del ambiente. El frente térmico se propaga en un material sustrato de conductividad $6.4 \text{ [W/(m}^*\text{K)]}$ en el plano normal a la superficie y $0.64 \text{ [W/(m}^*\text{K)]}$ en el plano paralelo a la misma, de capacidad térmica de $2460 \text{ [(W}^*\text{s)/(kg}^*\text{K)]}$, densidad $500 \text{ [kg/(m}^3\text{)]}$ y espesor 6 mm. Los defectos son considerados como aire de

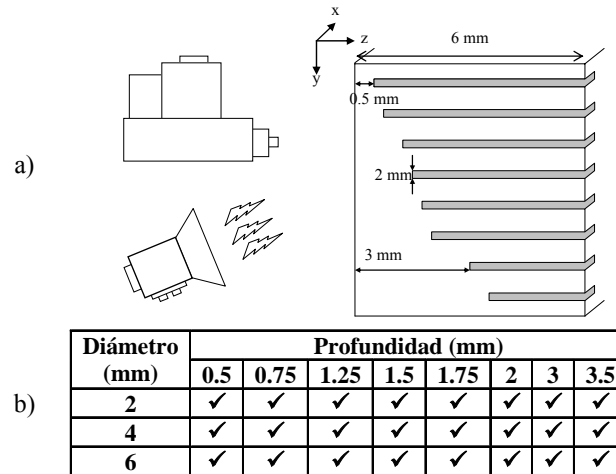


Figura 3-1. a) Montaje simulado para los termogramas de Figura 3-2 y Figura 3-3. b) defectos “taladros” simulados sobre sustrato descrito en texto. En las siguientes figuras estos defectos variarán de composición (aire, agua) o serán descritos como inclusiones.

conductividad $0.07 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$, de capacidad térmica de $928 \text{ [(W}\cdot\text{s)/(kg}\cdot\text{K)]}$, densidad $1.3 \text{ [kg/(m}^3\text{)]}$, 2 mm de diámetro y a profundidades de 0.5, 0.75, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 3 y 3.5 mm situados en posiciones correlativas desde la parte superior a la parte inferior de cada imagen. Simulan taladros en la parte posterior del espécimen por lo que su espesor varía desde 5.5 mm a 2.5 mm, respectivamente.

En una primera observación, se denota el proceso de transferencia de calor entre el pulso luminoso y la muestra. En la Figura 3-2 se muestran varias imágenes de color uniforme que indican que no existe diferencia térmica alguna en toda la superficie. Este hecho es captado tanto en instantes previos a la excitación como en los inmediatamente posteriores hasta que el reflejo del frente térmico de conducción sobre el defecto menos profundo llegue a la superficie. En la Figura 3-3, sin llegar a terminar la excitación, los defectos resultan visibles ya que el tiempo invertido en reflejarse la primera anomalía sobre la superficie es menor que el tiempo de excitación. Según transcurre el tiempo de la captura, el espécimen va enfriándose globalmente y los defectos más profundos van haciendo aparición aunque con un contraste cada vez menor. Aunque no está recogido en las figuras presentadas, el proceso culmina con imágenes de color uniforme y contraste absoluto nulo que implica que la muestra ha alcanzado el equilibrio con el entorno. Otro detalle de interés resulta de la comparativa de la liberación de energía empleada en ambas excitaciones; 3 KW/m^2 durante 0.5 s. provocan un contraste de temperaturas superior que 100 KW/m^2 durante un flash de 0.01 s. como se desprende de los termogramas en 1 s. La generación de estas potencias no requieren los mismos recursos.

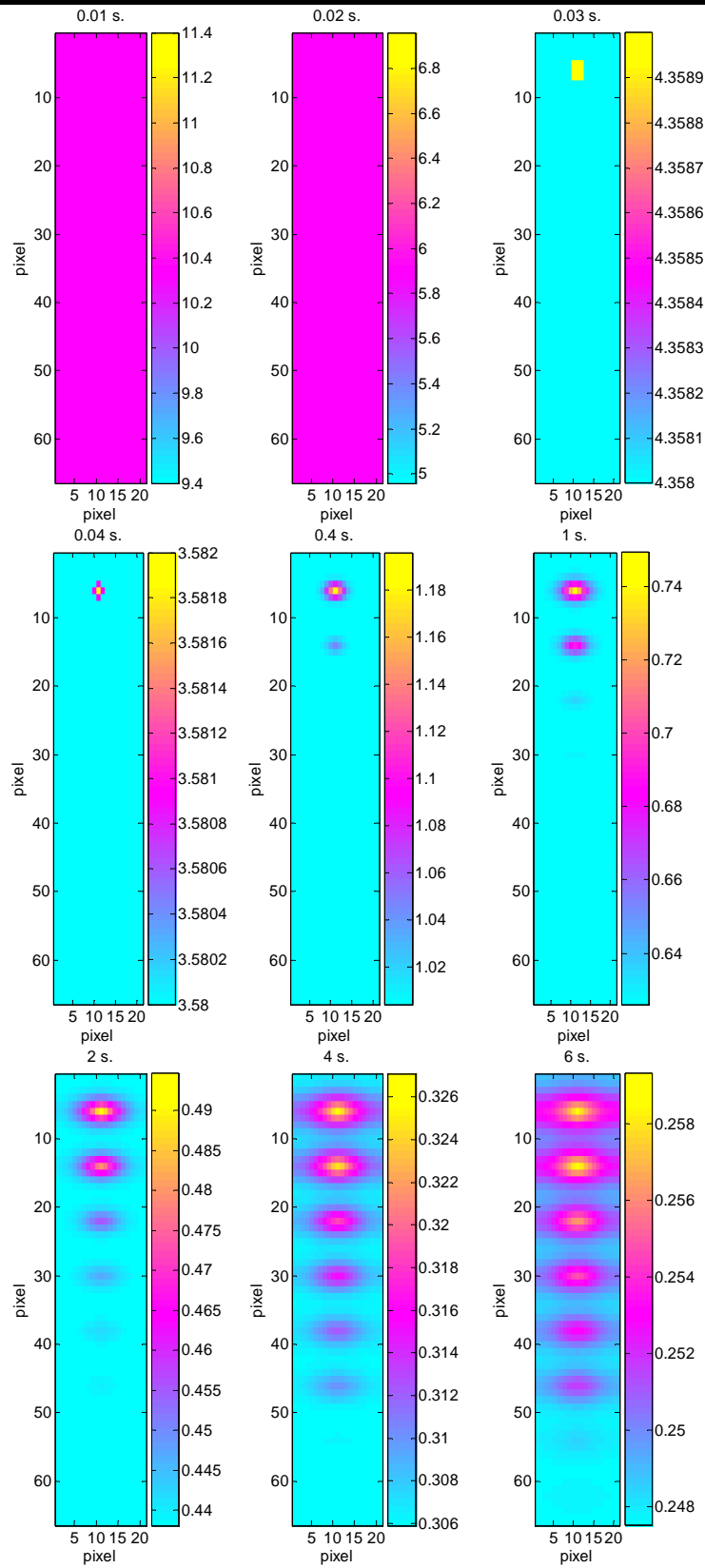


Figura 3-2. Termogramas pertenecientes a la secuencia de imágenes que simula la evolución de un frente térmico provocado por una excitación en forma de flash de 0.01 segundos y potencia 100KW/m² sobre un espécimen descrito en el texto.

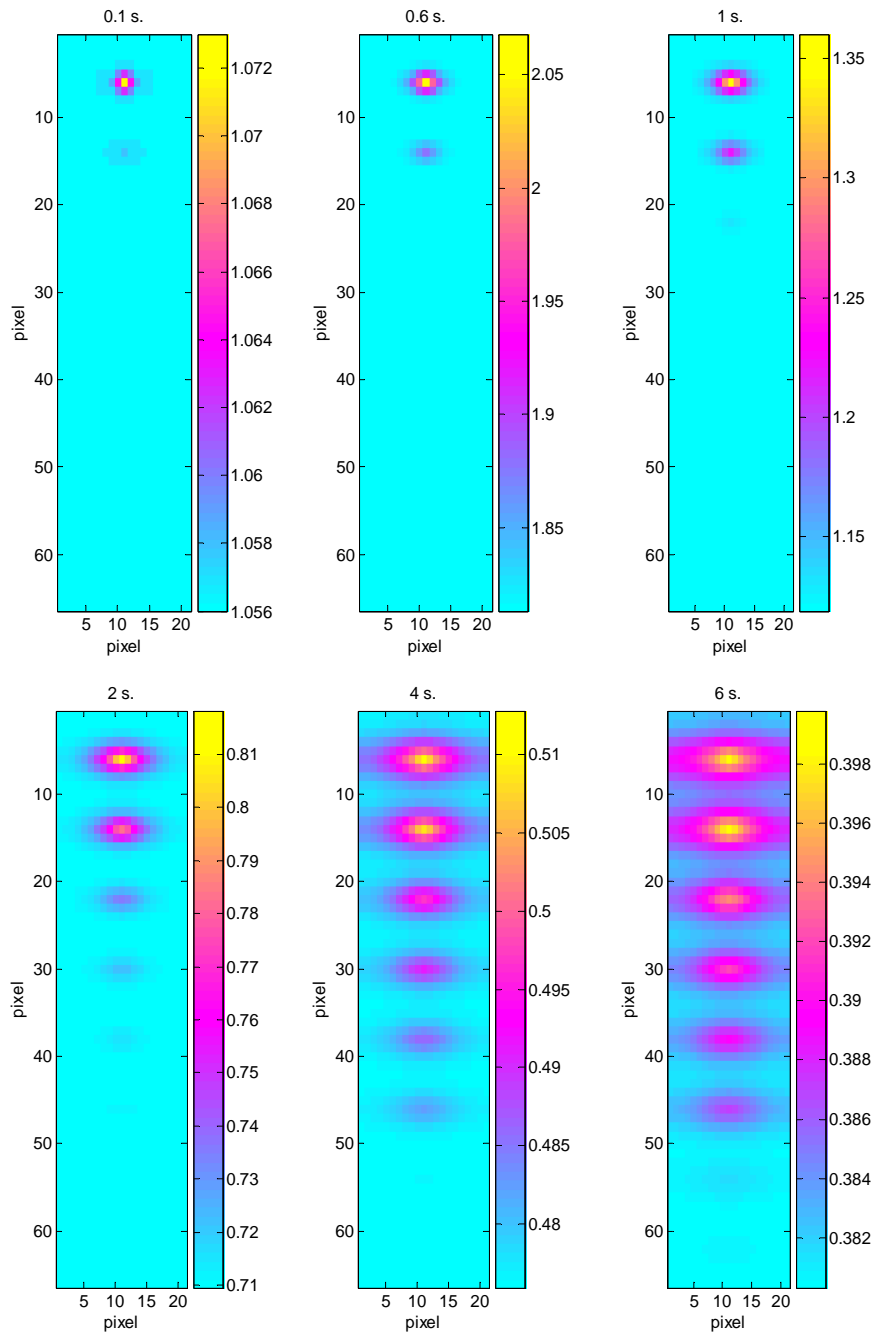


Figura 3-3. Termogramas pertenecientes a la secuencia de imágenes que simula la evolución de un frente térmico provocado por una excitación en forma de pulso de 0.5 segundos y potencia 3KW/m^2 sobre un espécimen descrito en el texto.

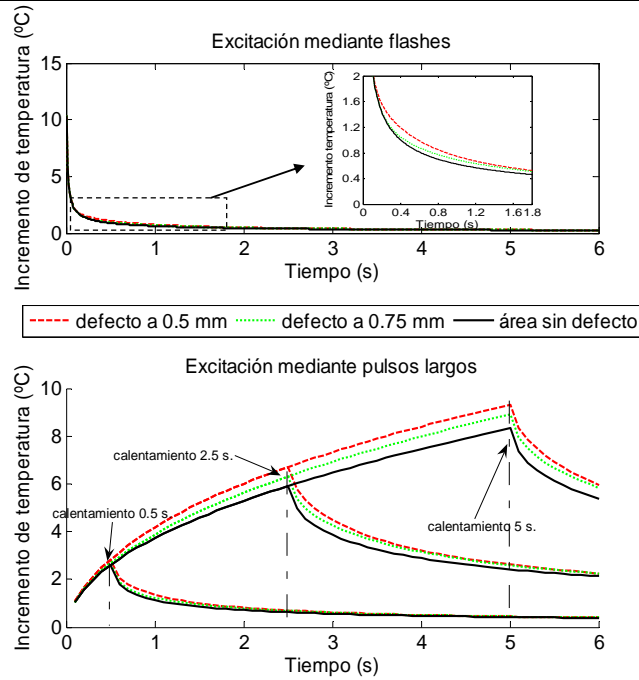


Figura 3-4. Simulación de la temperatura superficial en un espécimen que asemeja un material compuesto de fibra de carbono bajo excitación instantánea (flash de 0.01 segundos y 100KW/m²) y excitación en forma de pulso de larga duración (0.5, 2 y 5 segundos y 3KW/m²). Las evoluciones corresponden a un píxel superficial sobre un defecto que asemeja un taladro por la parte posterior a 0.5 y 0.75 mm de profundidad y a un píxel sobre una zona libre de defectos. Las características del material sustrato y de los defectos utilizadas en la simulación son recogidas en el texto con anterioridad.

3.2.2.b Detectabilidad en función de las características de los defectos

En el análisis de las secuencias termográficas, dos pares de parámetros resultan de interés al proveer de información práctica sobre los defectos subsuperficiales. Estos son: la diferencia de temperatura máxima sobre o por debajo de la discontinuidad, ΔT_m , y el tiempo para su óptima observación, $t_m(\Delta T_m)$; y el contraste máximo²⁹, C_m , y el tiempo para su óptima observación, $t_m(C_m)$. Los distintos contrastes máximos³⁰ que pueden ser utilizados [Maldague, 2001], además de ser variables adimensionales, son independientes de la potencia de la excitación externa ya que tanto la diferencia de temperaturas máxima como la temperatura son linealmente proporcionales a la potencia de calor absorbida por la superficie, Q , como se desprende de las ecuaciones B.1, B.2 y B.3 del Anexo B.

En la Figura 3-4 se observa el incremento de la temperatura superficial de un espécimen bajo excitaciones luminosas pulsada instantánea y de pulsos de

²⁹ Definido como el cociente entre la diferencia de temperaturas máxima y una temperatura determinada.

³⁰ Contraste absoluto: temperatura en exceso o en defecto con respecto a una temperatura de referencia, $C^a(t) = \Delta T(t) = T_{def}(t) - T_{nodef}(t)$

Contraste running: contraste máximo, $C^r(t) = \frac{\Delta T(t)}{T_{nodef}(t)}$

Contraste normalizado: contraste respecto a los valores de temperatura al instante $t_m(\Delta T_m)$, $C^n(t) = \frac{T_{def}(t) - T_{nodef}(t)}{T_{def}(t_m) - T_{nodef}(t_m)}$

Contraste standard: contraste respecto a los valores de temperatura al instante t_0 , anterior a la excitación $C^s(t) = \frac{T_{def}(t) - T_{def}(t_0)}{T_{nodef}(t) - T_{nodef}(t_0)}$

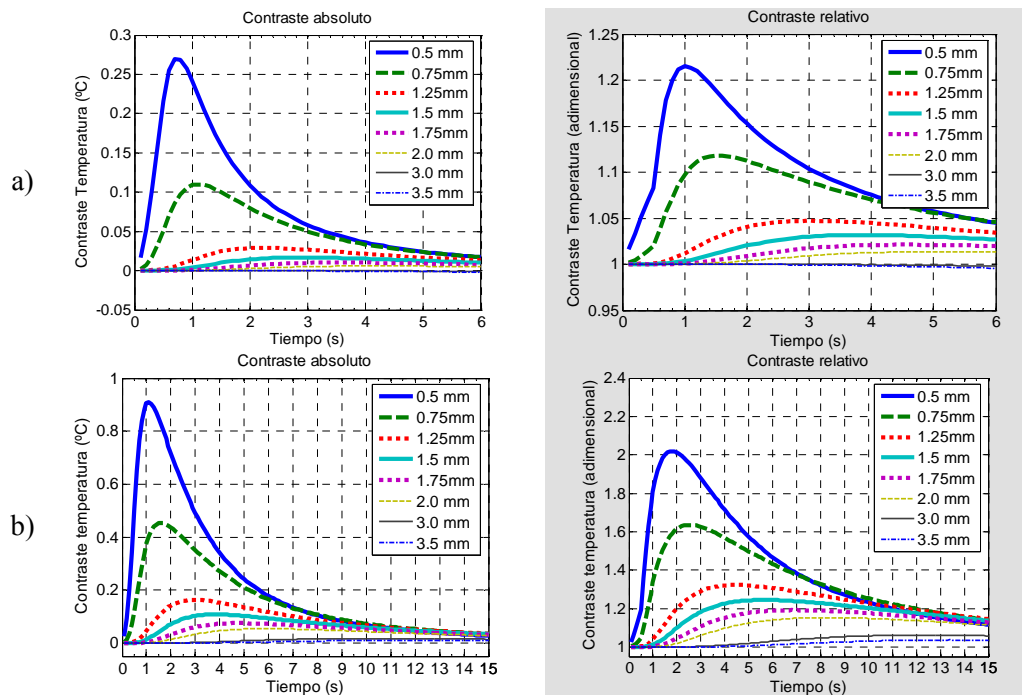


Figura 3-5. Simulación de la temperatura superficial en un espécimen bajo excitación en forma de pulso de larga duración (0.5 segundos y 3KW/m²). Las evoluciones corresponden a la temperatura de un pixel superficial sobre defectos que asemejan un taladro por la parte posterior a profundidades desde 0.5 a 3.5 mm. El material sustrato y los defectos poseen la misma composición y características que aquellos de la Figura 3-4 salvo que ahora los defectos son cuadrados de lado a) 2 mm y b) 6 mm. La zona no sombreada se corresponde con el contraste absoluto mientras que la sombreada recoge el contraste relativo definido como:

$$C^{relativo}(t) = \frac{T_{def}(t)}{T_{nodef}(t)} = C^r(t) + 1$$

larga duración para zonas con defecto subsuperficial y zonas libres de defectos (*soundareas*). A partir de estas evoluciones, la obtención y motivación del uso de los parámetros de interés anteriormente mencionados resulta evidente. Los defectos son claramente detectados y su profundidad directamente relacionada por el contraste térmico que producen. Igualmente se observa que la detección bajo excitaciones prolongadas puede ser llevada a cabo incluso antes de acabar de excitar la muestra, siendo a continuación, un enfriamiento de similares características al producido en el caso de termografía pulsada mediante flashes.

Diferentes análisis pueden ser realizados de acuerdo a la profundidad, tamaño, espesor y composición de los defectos subsuperficiales. Valga de ejemplo la inclusión de las figuras: Figura 3-5, Figura 3-6 y Figura 3-7. Más detalles pueden ser encontrados en [Vavilov, 2001].

Como se desprende de la Figura 3-5 y Figura 3-6, tanto mayor será el contraste absoluto como el contraste relativo (definido como el cociente entre la temperatura de un punto y la temperatura de otro punto en una *soundarea*) cuanto más grandes o menos profundos sean o se encuentren los defectos. Las características de densidad, capacidad térmica y difusividad del material que compone la anomalía también modifican la diferencia de temperatura máxima sobre o por debajo de la discontinuidad y el tiempo para su óptima observación. De hecho, cuanto más cercana sea la conductividad térmica del defecto a la del material huésped, mayor debe ser la anomalía para poder ser detectada. De igual

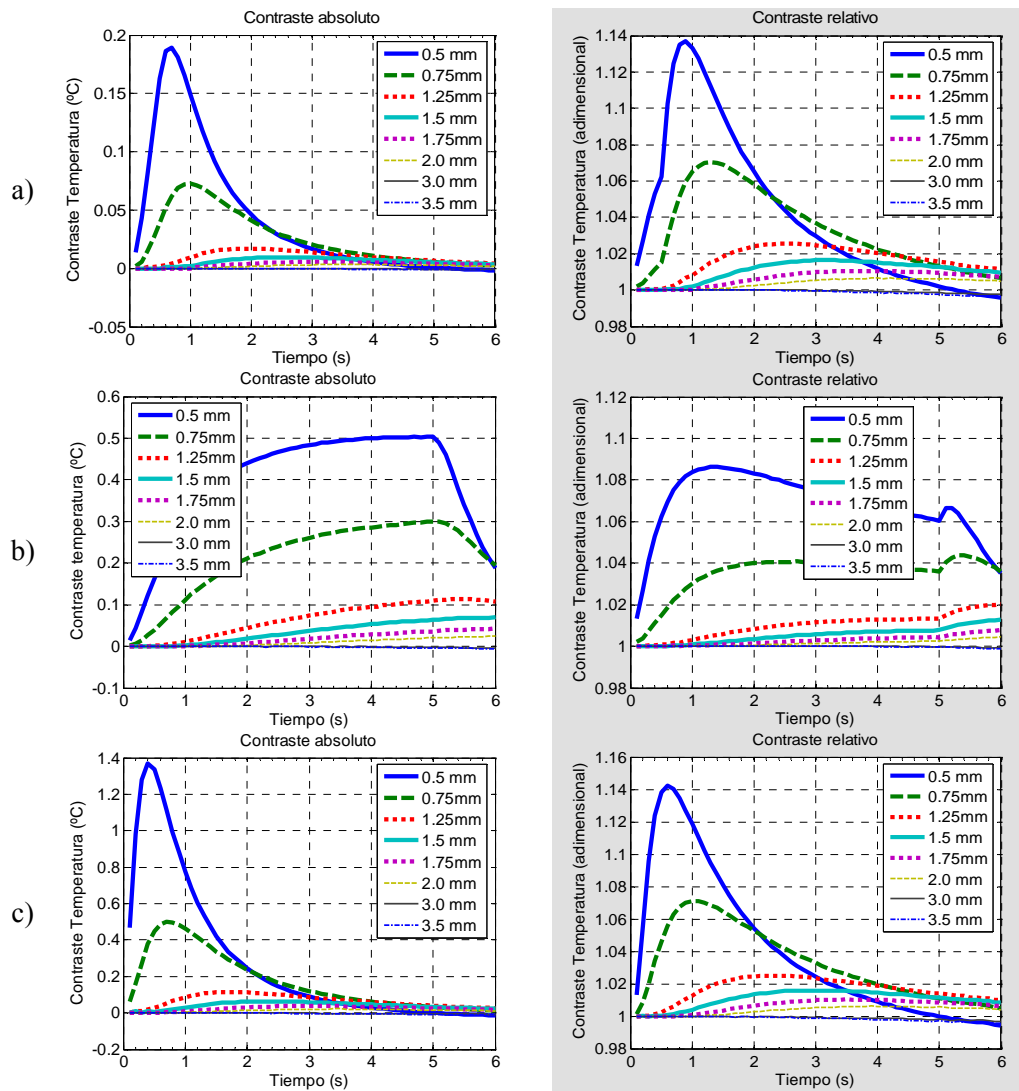


Figura 3-6. Simulación de la temperatura superficial en un espécimen bajo excitación en forma de a) pulso de larga duración (0.5 segundos y 3KW/m²), b) pulso de larga duración (5 segundos y 3KW/m²) y c) excitación instantánea (flash de 0.01 segundos y 100KW/m²). Las evoluciones corresponden a la temperatura de un pixel superficial sobre defectos que asemejan un taladro por la parte posterior a profundidades desde 0.5 a 3.5 mm. El material sustrato posee la misma composición y características que el de la Figura 3-4. Los defectos son considerados como si estuvieran rellenos con agua en lugar de aire de conductividad 0.6 [W/(m*K)], de capacidad térmica de 4193 [(W*s)/(kg*K)], densidad 1 [kg/(m³)] y 2 mm de diámetro. La zona no sombreada se corresponde con el contraste absoluto mientras que la sombreada recoge el contraste relativo definido como en la Figura 3-5.

forma, como se observa en la Figura 3-7, el aumento del espesor contribuye a un mayor incremento térmico en la superficie de la muestra, favoreciendo así su detectabilidad.

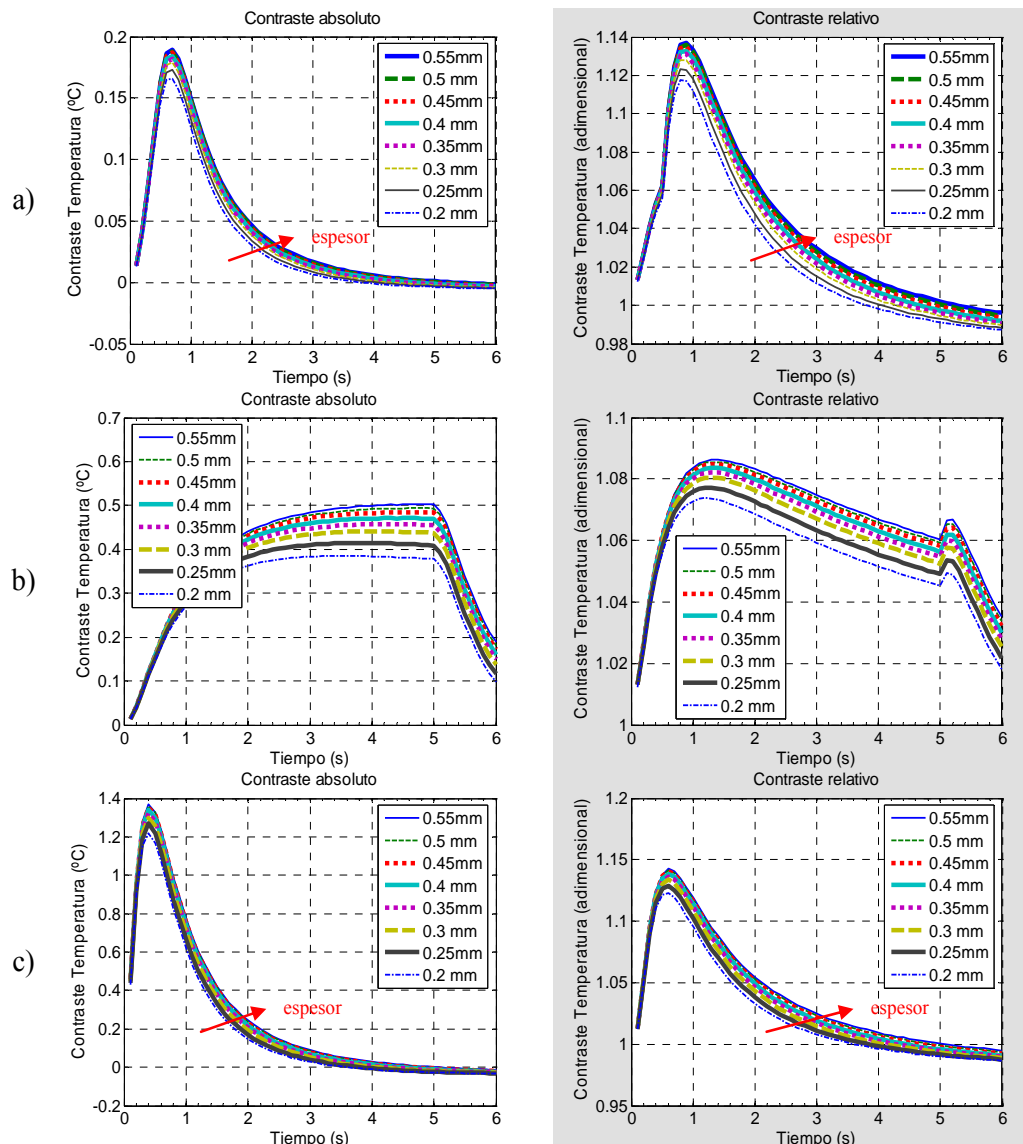


Figura 3-7. Simulación de la temperatura superficial en un espécimen bajo excitación en forma de a) pulso de larga duración (0.5 segundos y 3KW/m^2), b) pulso de larga duración (5 segundos y 3KW/m^2) y c) excitación instantánea (flash de 0.01 segundos y 100KW/m^2). Las evoluciones corresponden a la temperatura de un píxel superficial sobre defectos que asemejan inclusiones de agua con espesores desde 0.55 a 0.2 mm. El material sustrato posee la misma composición y características que el de la Figura 3-4. Los defectos son considerados como si estuvieran rellenos con agua de conductividad $0.6 [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$, de capacidad térmica de $4193 [(\text{W}\cdot\text{s})/(\text{kg}\cdot\text{K})]$, densidad $1 [\text{kg}/(\text{m}^3)]$ y 2 mm de diámetro. La zona no sombreada se corresponde con el contraste absoluto mientras que la sombreada recoge el contraste relativo definido como en la Figura 3-5.

La inspección de anomalías de tamaño considerable, poco profundas³¹, alejadas de los bordes o contornos y las características térmicas del espécimen apropiadas (baja difusividad lateral), que sean a la vez muy diferentes de las propias de las anomalías, ofrece mayor contraste térmico en la superficie. Por lo tanto, estas condiciones actúan a favor de una buena detectabilidad de las discontinuidades internas en los materiales.

³¹ Una regla empírica para materiales homogéneos e isótropos dice que la discontinuidad más pequeña detectable debe ser por lo menos de una a dos veces mayor que su profundidad bajo la superficie. Para materiales anisótropos, mayores ratios de tamaño versus profundidad son necesarios.

3.3 Criterio de decisión

Generalmente, el criterio de detección se establece cuando la amplitud de la señal térmica supera al nivel de ruido, es decir, cuando la relación señal a ruido excede la unidad. Se determina en función del NETD como se extrae de la siguiente ecuación [Vavilov, 2001]:

$$\frac{\Delta T_m(t)}{K \sigma_{sound}(t)} > 1 \quad \text{ec. 3.1}$$

$$\sigma_{sound}(t) = \sqrt{\sigma_+^2 + \sigma_x^2} = \sqrt{\Delta T_{res}^2 + \sigma_{reflx}^2(t) + \sigma_{emis}^2(t)}$$

donde σ_{sound} es la desviación estándar de la temperatura en un área libre de defectos y K es el coeficiente que determina la *veracidad* de la decisión (normalmente entre la unidad y tres).

El ruido que afecta a una imagen puede ser tanto aditivo como multiplicativo. El ruido aditivo no depende del parámetro medido sino que implica una resolución térmica determinada por el sistema de captura infrarrojo (ΔT_{res}) y ruido producido por reflexiones en la superficie (σ_{reflx}). Por otra parte, el ruido multiplicativo es proporcional a la medida y viene representado, principalmente, por las variaciones de emisividad (σ_{emis}). Al ser dependiente del valor de la medida, posee una variación temporal. El parámetro relación señal a ruido (SNR) alcanza entonces su máximo valor en un tiempo particular que se corresponde con el *tiempo de óptima observación práctica* (t_{mp}).

$$SNR_{max} = \frac{\Delta T_m(t)}{K \sigma_{sound}(t)} \Big|_{t_{mp}} = \frac{\Delta T}{K \cdot \Delta T_{res}} = \frac{\Delta T}{K \cdot NETD} \quad \text{ec. 3.2}$$

En los sistemas de imagen termográfica actuales, se ha reducido el NETD por debajo de 0.01°C. Ante estos valores tan bajos, como se desprende de la ec. 3.1, los factores de ruido derivado de las reflexiones del entorno y el ruido derivado de las variaciones de la emisividad pueden ser los que limiten la relación señal a ruido del sistema, por lo que hay que poner especial cuidado en su control o eliminación si es posible. La forma más habitual consiste en añadir un recubrimiento a la superficie del material de alta emisividad que rellene las rugosidades y porosidades aplanando la superficie.

Sin embargo, hay que aclarar que el criterio de decisión no sólo viene establecido por la relación SNR sino que debe considerarse también la resolución espacial y la resolución de la binarización de la temperatura de píxel, como se presentó anteriormente. Los sistemas actuales poseen una gran profundidad de bit (14 bits por lo general) por lo que el efecto de la cuantificación digital es despreciado. Sin embargo, en el caso de sistemas más antiguos o en el caso de usar menor resolución en las tarjetas digitalizadoras del vídeo analógico proveniente de una cámara infrarroja, este factor ha de considerarse porque reduce la detectabilidad del sistema. La resolución espacial puede variarse en función de la distancia a la que se realiza la inspección, por lo que no resulta determinante a no ser que se requieran inspecciones de especímenes que presentan una alta frecuencia espacial en cuanto a la localización de sus defectos.

Estos tres factores son las bases de una acertada detectabilidad aunque, en condiciones de inspección o prueba normales, bien es cierto que la mayor importancia recae en la sensibilidad térmica.

3.4 Criterio de detectabilidad ante una escasa digitalización

La detectabilidad puede ser definida como la capacidad de detectar los defectos. Ello será posible cuando la diferencia térmica observada sea superior a la NEDT, siempre que se eliminen los errores propios de los sistemas termográficos. Se ha comprobado que la digitalización de algunos sistemas provoca una pérdida de resolución térmica que en ciertos casos constituye una limitación más severa que la impuesta por la sensibilidad térmica. Haciendo uso de la definición de contraste relativo, se puede simular el efecto de una escasa digitalización (8 bits).

La resolución térmica en un sistema termográfico con salida digital que viene determinada por el cociente entre el rango dinámico de temperaturas capaz de medir y el número de niveles digitales que es capaz de cuantificar, como se trató en el apartado 2.2.1. En la actualidad y de forma general, el parámetro resolución térmica de los sistemas es despreciable ya que resulta común encontrar digitalizaciones de 14 bits. Sin embargo, existen casos particulares en los que no se dispone de una digitalización así, sobre todo por temas económicos. Puede resultar de interés utilizar cámaras más simples de salida analógica y obtener valores en formato digital mediante el uso de tarjetas digitalizadoras sencillas. La definición utilizada con anterioridad para el contraste relativo (cociente entre la máxima y la mínima temperatura medidas) permite controlar el efecto de la digitalización en la decisión de detectabilidad.

La Figura 3-8a recoge la definición de área de detectabilidad en un gráfico que relaciona la profundidad de los defectos y su tamaño. Según se reduce el tamaño de las anomalías o se incrementa la profundidad de las mismas, los procesos de difusión del calor reducen el contraste térmico superficial recogido como contraste absoluto que debe ser superior al NEDT, definiendo así uno de los límites de la detectabilidad. El otro límite que aparece en la Figura 3-8a se corresponde con el contraste relativo definido anteriormente como un cociente entre temperaturas, la temperatura superficial de un píxel situado sobre una zona defectuosa y la temperatura superficial de un píxel situado sobre un área libre de defectos. El rango dinámico de la medida debe ser suficientemente elevado como para poder distinguir perfectamente el ruido. Así el ratio entre la temperatura máxima y mínima debe ser superior a la resolución térmica del sistema marcada por la profundidad de bit de la digitalización del valor de temperatura.

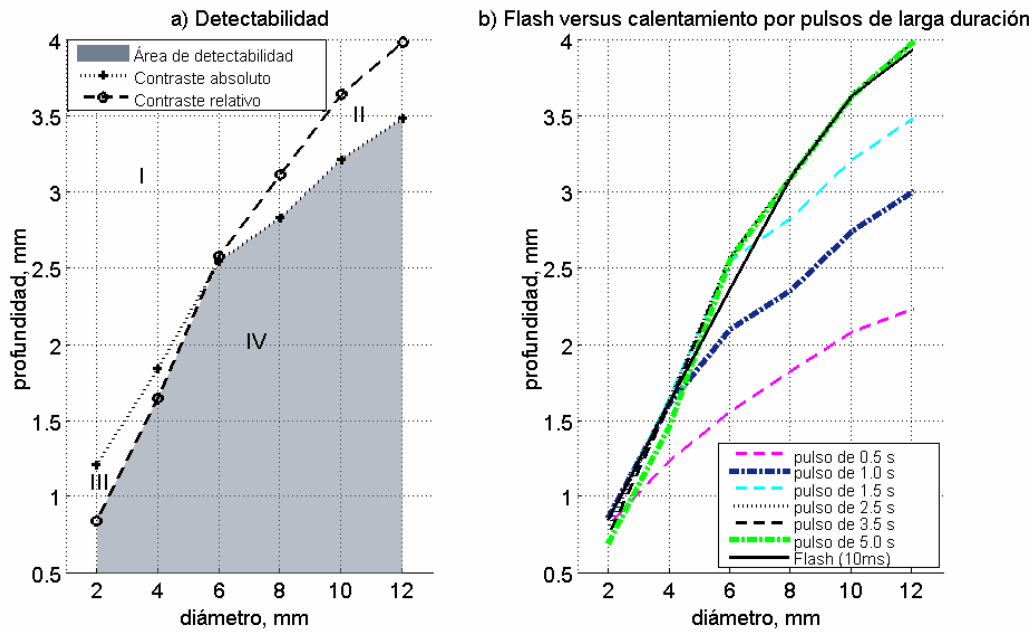


Figura 3-8. a) Definición de área de detectabilidad, limitada por el cumplimiento simultáneo de las condiciones de contraste absoluto superior a la sensibilidad térmica y el contraste relativo superior a la resolución térmica. La simulación ha sido considerada para una excitación de pulso de duración 1.5 s. y 3 KW/m². Este diagrama relaciona la profundidad y el diámetro de los defectos detectados. b) Límite del área de detectabilidad para diferentes excitaciones pulsadas. Simulación en un espécimen bajo excitación en forma de pulsos de larga duración (0.5 a 5 segundos y 3KW/m²) y una excitación instantánea (flash de 0.01 segundos y 100KW/m²).

Distinguidos los dos límites, se definen cuatro zonas. En la zona I se representa la relación diámetro-profundidad de defectos que en las simulaciones ha provocado un contraste absoluto inferior al valor de NEDT. Las zonas II y III representan variaciones de ese límite, generalmente utilizado para cuantificar la detectabilidad. Por una parte, la zona II implica que el ratio de temperaturas es elevado aunque su diferencia es pequeña. Se corresponde a los defectos más profundos donde, aún siendo de tamaño considerable, la señal es tan débil que es imposible discernirla del ruido. Por otra parte, la zona III, para los defectos más pequeños y menos profundos, representa una reducción de la detectabilidad en los casos en los que el rango dinámico de la captura sea elevado y no se tenga una buena digitalización. Por ejemplo, dos píxeles de dos áreas diferentes pueden tener un contraste absoluto mayor que NEDT pero esta diferencia puede no ser detectable si el rango de temperaturas captado es demasiado elevado para los niveles de cuantificación utilizados, esto es, baja resolución térmica. Finalmente, la zona IV implica una relación entre profundidad y diámetro que es perfectamente detectable.

3.5 Compensación de una escasa digitalización

Aplicando la definición del área de detectabilidad se presenta una comparativa entre la termografía pulsada con excitación por medio de flashes de alta potencia (sin la problemática de la digitalización) y aquella con excitación producida con pulsos de menor potencia pero de mayor duración bajo la condición de una escasa digitalización. Se observa que el hecho de mantener por más tiempo una excitación contribuye a la expansión del área de detectabilidad hasta límites

semejantes al caso de una excitación pulsada con flashes que representa el caso de mayor detectabilidad.

En la Figura 3-8b se recoge el efecto de la duración del pulso de la excitación sobre el conjunto de los dos límites, definidos anteriormente, que confinan la zona IV. Básicamente se interpreta que a mayor duración de pulso mayor es la energía liberada y, por lo tanto, se incrementa la detectabilidad como se introdujo en el apartado 3.2.2.a. Se observa que, por efecto de la escasa digitalización, la detectabilidad asociada a la termografía de pulso largo es sensiblemente inferior a la termografía pulsada. Aún liberando mayor energía de excitación, la escasa digitalización limita la termografía de pulso largo en situaciones con pulsos inferiores a 2.5 segundos (lo que representa una energía suministrada 7.5 veces superior). Sin embargo, es significativo que, aumentando el tiempo de excitación, el efecto de la escasa digitalización es compensado.

3.6 Discusión de los resultados

Los sistemas con limitación en profundidad de bits no deben ser inmediatamente descartados para su uso en detección de defectos subsuperficiales. La termografía basada en pulsos largos en estos sistemas permite, con la aplicación de mayor energía, subsanar la pérdida de detectabilidad que presentan. Se convierte así en la técnica óptima para ser combinada con los equipamientos de prestaciones más limitadas, siendo poco significativo el mayor consumo energético ya que sus recursos (lámparas) son además mucho más económicos.

Para validar los resultados teóricos previos sobre detectabilidad de sistemas con escasa digitalización se han realizado exhaustivos trabajos experimentales. Para ello se ha utilizado un sistema de TWI Inc., ThermoScope de NEDT 0.02K, basado en flashes y un sistema hecho a medida³² y sensiblemente más económico ya que usa lámparas infrarrojas y la cámara miniatura ThermoVision A10T de tecnología microbolómetro. Esta última cámara ha sido caracterizada experimentalmente mientras su salida analógica es convertida a valores digitales de 8 bits de profundidad [Gonzalez, 2005-BINDT]. El nivel de ruido es cuantificado en ± 10 niveles digitales sobre un máximo de 210 para la máxima ganancia disponible en el detector y con una sensibilidad térmica (NEDT) de 0.085 °C. Esto conlleva, aplicando la ec. 2.1, a que sobre un rango dinámico de 0.89°C, el ruido representa aproximadamente un 10%.

El sistema de cámara miniatura posee una digitalización de 8 bits que limita su aplicabilidad en detección de defectos subsuperficiales. Sin embargo, la excitación mediante pulsos térmicos largos generados por lámparas infrarrojas incrementa la detectabilidad que el sistema ofrece, como se constata en la Figura 3-9 y según se demostró teóricamente con anterioridad. Por otro lado, el sistema

³² Este sistema fue desarrollado en el Materials Research Center de la Universidad de Bath en el Reino Unido bajo la dirección del profesor D.P. Almond en el proyecto AHEAD (Growth Programme GIRD-CT-2001-00673, Title: New ways of manufacturing large non-rigid structures through innovative production systems, Acronym: AHEAD). El autor de esta obra contribuyó en la caracterización de las posibilidades del sistema para la medida cuantitativa de defectos subsuperficiales así como en las tareas propias de mantenimiento, revisión y actualización hardware de dicho sistema.

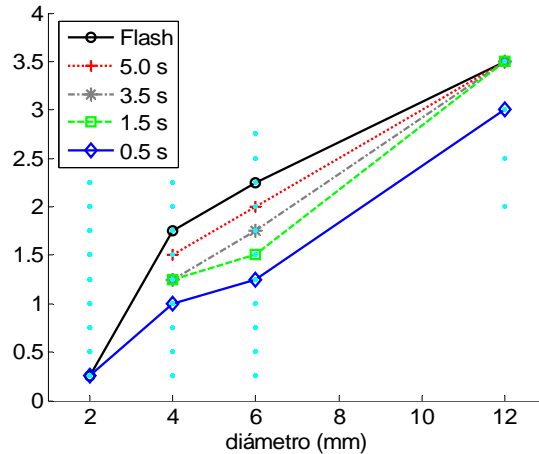


Figura 3-9. Diagrama profundidad-dímetro de los defectos detectados para diferentes excitaciones pulsadas. No se trata del límite teórico del área de detectabilidad sino de un límite práctico obtenido tras diferentes experiencias sobre un espécimen CFPR (*carbon fibre reinforced plastic*) que contiene tantos defectos como puntos azul claro se pueden observar.

ThermoScope representa uno de los equipamientos punteros en el estado del arte de la termografía infrarroja. Diseñado para aplicaciones de detección de anomalías internas en materiales, su baja NEDT y potentes flashes llevan a detectabilidades mayores sobre el mismo espécimen.

A pesar de la gran diferencia en términos de sensibilidad térmica y en el coste que lleva asociado todo el sistema, los resultados prácticos mostrados en la Figura 3-9 delatan que en términos de detectabilidad ambos sistemas ofrecen resultados comparables. Los desacuerdos con las predicciones de las simulaciones teóricas son explicados por las no uniformidades en el calentamiento de la superficie que existen en el caso real [Gonzalez, 2005-BINDT]. Es importante señalar que en el caso de excitaciones con pulsos de larga duración, las no uniformidades del calentamiento son mucho más determinantes.

3.7 Conclusiones y resultados relevantes

A lo largo de este capítulo se ha revisado el concepto de detectabilidad en termografía infrarroja. Con el control o medida de la temperatura superficial de un material durante todo el proceso, se es capaz de relacionar las variaciones detectadas con lo que esté ocurriendo dentro del espécimen. La detectabilidad se establece como un umbral cuantificable que permite la detección de anomalías internas en el objeto bajo inspección. Depende de la sensibilidad térmica del sistema y de la resolución espacial del mismo. A pesar de la generalización del uso de la diferencia de temperaturas equivalente al ruido (NETD) como criterio de decisión, se aclara que en realidad se debe utilizar el concepto de mínima diferencia de temperaturas resoluble (MRTD) que también tiene en cuenta la resolución espacial del sistema.

Se han estudiado los factores que influyen en la detectabilidad de anomalías. Estos factores serán característicos de la superficie del objeto bajo medida, del medio de transmisión entre el objeto y el equipo inspector o del instrumento de medida. Las variaciones de emisividad, el efecto de las reflexiones, la degradación del equipamiento, tanto en su óptica como en su

electrónica, las características térmicas del material (conductividades y difusividades) y las características físicas y mecánicas de las anomalías (tamaño, profundidad, localización cerca de bordes u otras discontinuidades) caracterizan la detectabilidad. La inspección de anomalías de tamaño considerable, poco profundas, alejadas de los bordes o contornos y las características térmicas del espécimen apropiadas (baja difusividad lateral) actúan a favor de una buena detectabilidad de las discontinuidades internas en los materiales. Pero, además, existe la posibilidad de incrementar el contraste térmico entre material y discontinuidad mediante el aporte de una mayor energía térmica al objeto bajo inspección, esto es, la termografía infrarroja activa. Basándose en las termografías activas pulsadas, la aplicación de pulsos de mayor o menor duración conlleva diferencias en cuanto a la detectabilidad de los defectos (sobre todo en el valor del máximo contraste y el tiempo de observación del máximo contraste).

Se establece un nuevo criterio de detectabilidad. La definición de los parámetros que dan lugar al área de detectabilidad permite valorar el efecto de la limitación impuesta por una escasa digitalización. Los sistemas termográficos así limitados pueden compensar la detectabilidad que ofrecen combinándose con excitaciones pulsadas de mayor duración. Anomalías a mayor profundidad y de menor tamaño ofrecen así contrastes de temperatura detectables en comparación con la resolución térmica y la sensibilidad térmica del sistema.

Otra forma de ver el incremento en efectividad de detección que se obtiene aumentando el tiempo de la excitación, es que la utilización de pulsos térmicos de mayor duración permite la utilización de cámaras termográficas de menores prestaciones con la consiguiente reducción de costes. Los resultados de los estudios teóricos sobre detectabilidad han sido contrastados experimentalmente con éxito. Para ello se han empleado diferentes cámaras y sistemas termográficos. Haciendo uso del concepto de detectabilidad, se han evaluado dos sistemas diferentes: un sistema de bajo coste, basado en lámparas de radiación infrarroja y una cámara de infrarrojos miniatura, y un sistema comercial de TWI Inc. El sistema desarrollado por el Materials Research Center de la Universidad de Bath en el Reino Unido es capaz de ofrecer resultados comparables al sofisticado sistema ThermoScope, gracias al empleo de una excitación mediante termografía de pulso largo que compensa su escasa digitalización.

Finalmente debe mencionarse que las contribuciones relacionadas con este capítulo han sido recogidas en varias publicaciones. A lo largo del capítulo han aparecido referencias a los distintos trabajos elaborados por el autor, señaladas mediante el uso de diferentes notas al pie de página.

Capítulo 4

Automatización del procesado de imágenes

Toda automatización de un proceso lleva consigo la reducción de las subjetividades inherentes a componentes o al conjunto del sistema aumentando la efectividad. En este capítulo se presentan diferentes algorítmicas que de forma automática generan una única imagen donde los defectos detectables pueden ser localizados.

Como se introduce, la definición de contraste diferencial permite el modelado del perfil temporal que sigue la temperatura de un píxel superficial, siempre que esté en un área libre de defectos. Ante la evolución de un píxel correspondiente a un área de influencia de una anomalía interna, el modelo difiere claramente, siendo así posible la detección de los defectos internos.

Tras excitar el objeto bajo estudio con un pulso térmico en forma de flash se valora, automáticamente, la evolución de la temperatura superficial y se contrasta con un modelo lineal de pendiente $-1/2$. Para el ajuste del perfil, que sigue la evolución de la temperatura superficial, a una recta se han desarrollado varios algoritmos. Para ello se han propuesto métodos estadísticos y técnicas basadas en transformadas de espacio de los datos adquiridos.

Las propuestas han sido validadas experimentalmente en el laboratorio en el que se ha logrado la automatización plena de procesos de detección de anomalías internas. Los resultados obtenidos son comparables a los alcanzados por un operador especializado trabajando en condiciones óptimas.

4 Automatización del procesado de imágenes

4.1 Introducción

A través de los termogramas de una superficie, se pueden detectar y evaluar defectos, imperfecciones y cambios de composición en el interior de objetos de una forma rápida, fiable y segura. La cámara o sistema de detección infrarroja detectará únicamente la radiación emitida, que contiene información del comportamiento térmico interno.

Los mecanismos de transferencia del calor en sólidos permiten determinar anomalías internas en un material, simplemente observando la variación de la temperatura superficial del espécimen. En el anexo D se presentan los procesados más comunes empleados en la evaluación de materiales que ayudan al operador de un sistema termográfico en la detección de anomalías subsuperficiales bajo una excitación pulsada (la más utilizada de las termografías activas). Las secuencias resultantes contienen altos niveles de ruido en todas sus formas: electrónico, óptico, estructural, térmico, etc. Las decisiones sobre la detectabilidad y cuantificación de los defectos poseen por lo tanto una gran componente subjetiva y fuertemente dependiente de la experiencia personal. Diferentes organizaciones alrededor del mundo otorgan certificaciones de personal (inspector termográfico nivel I, II y III) [ASNT, 2001] para contrastar la experiencia del termógrafo en el uso de esta tecnología. La automatización de cualquier parte del proceso contribuye a reducir la incertidumbre propia de la subjetividad humana y a aumentar la efectividad del proceso de decisión.

4.1.1 Adecuación de los tiempos de adquisición

El proceso “natural” de evaluación de la inspección por termografía activa radica en la variación temporal de la temperatura superficial en un objeto. La transformación de los datos ofrecidos por el sistema termográfico en otros dominios, sea dominio frecuencial a través de la transformada de Fourier, de Laplace o Wavelets, o sea descomposición en componentes principales, conlleva el riesgo de una pérdida de información, en mayor o menor medida, por los efectos de muestreo y truncado de la componente temporal. Así, el presente trabajo se centra en el tratamiento de datos de temperatura y su evolución en función del tiempo manteniendo intacta la información que el tiempo ofrece.

Partiendo de la respuesta a un impulso de Dirac aplicado sobre un objeto (termografía activa pulsada), la variación temporal de la temperatura experimentada en la superficie del material sigue la ecuación [Carslaw, 1986]:

$$T(t) = T_0 + \frac{Q_0}{e\sqrt{\pi t}} \quad \text{ec. 4.1}$$

donde T_0 en °K es el gradiente de temperatura inicial inducido por la fuente de calor, Q_0 (J/m²) es la energía absorbida por la superficie y donde e , $e = \sqrt{k\rho c_p}$, es la efusividad del material, con k [W/m°K] la conductividad térmica, ρ [kg/m³] la

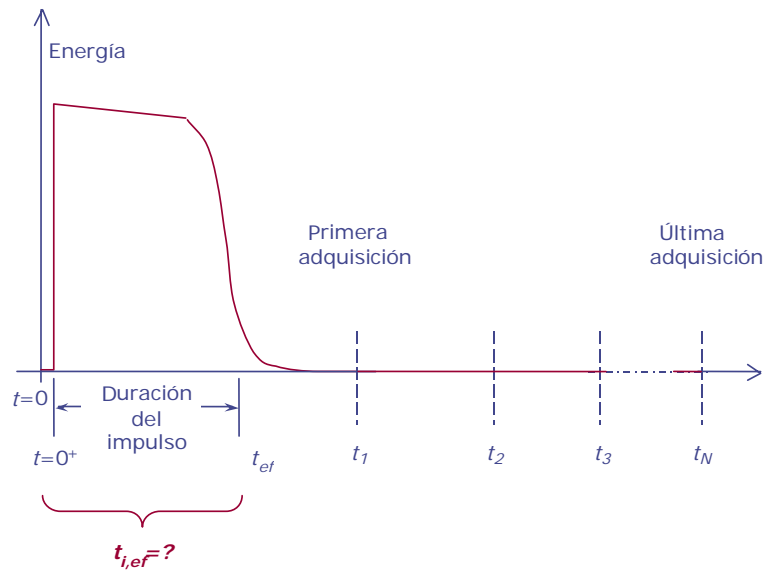


Figura 4-1. Secuencia temporal de la excitación. Los diferentes tiempos indican la captura de termogramas válidos (sin influencia de la excitación) tras la excitación pulsada.

densidad del material y c_p [J/kg $^{\circ}$ K] el calor específico. Véase anexo B para más detalles.

Esta respuesta es considerada ideal, con una excitación impulsional de amplitud infinita y duración nula. En la práctica, la duración del impulso es finita y su amplitud limitada aproximándose a la forma de la Figura 4-1. El impulso puede sufrir además un mayor deterioro en su perfil ascendente ante la pobre respuesta de los flashes tras la recepción de la señal de destello, por ejemplo, motivado por el uso de flashes relativamente deteriorados.

Para la aplicación del modelo térmico propuesto por la ec. 4.1, es necesario especificar un tiempo de referencia $t_{i,ef}$ apropiado. Parece lógico seleccionar el instante en el que el frente térmico alcanza la superficie del espécimen. Sin embargo este tiempo puede estar comprendido entre los instantes $t=0$ y t_{ef} , que se corresponden con los tiempos de inicio y fin del pulso de excitación. Considerando t' como un tiempo comprendido entre $t_{i,ef}$ y el tiempo al que el primer defecto hace su aparición sobre la superficie, t_{def} , la temperatura de un área libre de defectos en el instante t' viene dada por:

$$\Delta T_{soundarea[i,j]}(t') = \Delta T_{[i,j]}(t') = \frac{Q_{[i,j]}}{e_{[i,j]}\sqrt{\pi t'}} \quad \text{ec. 4.2}$$

A partir de esta relación es posible estimar la temperatura en la zona libre de defectos, *soundarea*, en función del tiempo:

$$\Delta T_{soundarea[i,j]}(t) = \frac{Q_{[i,j]}}{e_{[i,j]}\sqrt{\pi t}} = \frac{\sqrt{\pi t'}}{\sqrt{\pi t}} \Delta T_{[i,j]}(t') = \sqrt{\frac{t'}{t}} \Delta T_{[i,j]}(t') \quad \text{ec. 4.3}$$

Combinando este resultado con las definiciones de contraste absoluto [Maldague,2001], el contraste absoluto diferencial (*differential absolut contrast*, DAC) es definido como [Pilla, 2002]:

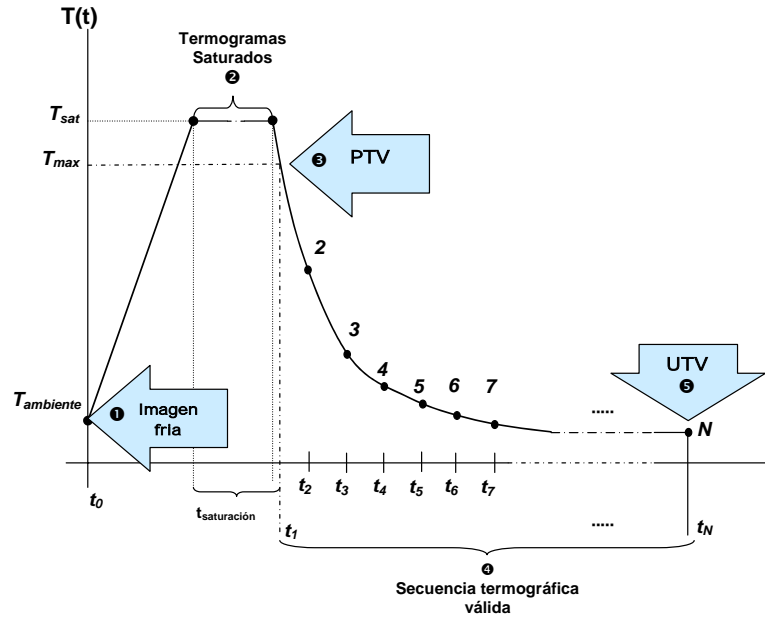


Figura 4-2. Secuencia termográfica completa: ❶ imagen fría ❷ parte de la secuencia donde los termogramas están saturados por efecto de la excitación ❸ PTV: primer termograma válido (no saturado) ❹ parte de la secuencia termográfica que permite la evaluación del material ❺ UTV: último termograma válido (donde aún se denota cierto contraste térmico en la imagen por encima del umbral de ruido).

$$C_{DAC}(i, j, t) = \Delta T_{[i,j]}(t) - \sqrt{\frac{t'}{t}} \Delta T_{[i,j]}(t') \quad \text{ec. 4.4}$$

donde

$$\begin{aligned} \Delta T_{[i,j]}(t) &= T_{[i,j]}(t) - T_{[i,j]}(t=0) & \text{ec.} \\ \Delta T_{[i,j]}(t') &= T_{\text{soundarea}[i,j]}(t') - T_{\text{soundarea}[i,j]}(t=0) = T_{\text{soundarea}[i,j]}(t') - T_{[i,j]}(t=0) & 4.5 \end{aligned}$$

y el término $T_{[i,j]}(t=0)$ corresponde a la imagen fría de la secuencia, es decir, al termograma del espécimen antes de la llegada del frente térmico (ver Figura 4-1). En la ecuación, $T_{\text{soundarea}[i,j]}(t=0)$ es igual a $T_{[i,j]}(t=0)$ en tanto no haya ningún defecto visible en $t=0$.

La secuencia termográfica completa que, en términos generales es capturada, está compuesta de cinco elementos característicos como se aprecia en la Figura 4-2. En el instante t_0 , anterior a que el frente de calor de la excitación alcance la superficie del material bajo inspección (anterior por lo tanto al instante $t=0$ de la Figura 4-1), se captura una o varias imágenes frías, ❶ *cold image*, de gran utilidad para eliminar reflexiones espurias, corregir las variaciones de emisividades de los distintos puntos de la superficie y reducir el patrón de ruido fijo (ver FPN en el anexo D). Durante la aplicación de la excitación externa (en termografía activa), la secuencia adquirida presenta una serie de termogramas saturados (la temperatura se encuentra fuera del rango dinámico de la medida) que no pueden aportar ninguna información ❷. Su número depende de la frecuencia de captura del sistema, de la duración de la excitación (termografía pulsada, termografía de pulso largo) y de las propiedades térmicas del material (si posee una baja conductividad térmica, la secuencia de termogramas saturados será más duradera en el tiempo). El primer termograma válido (PTV) es entonces

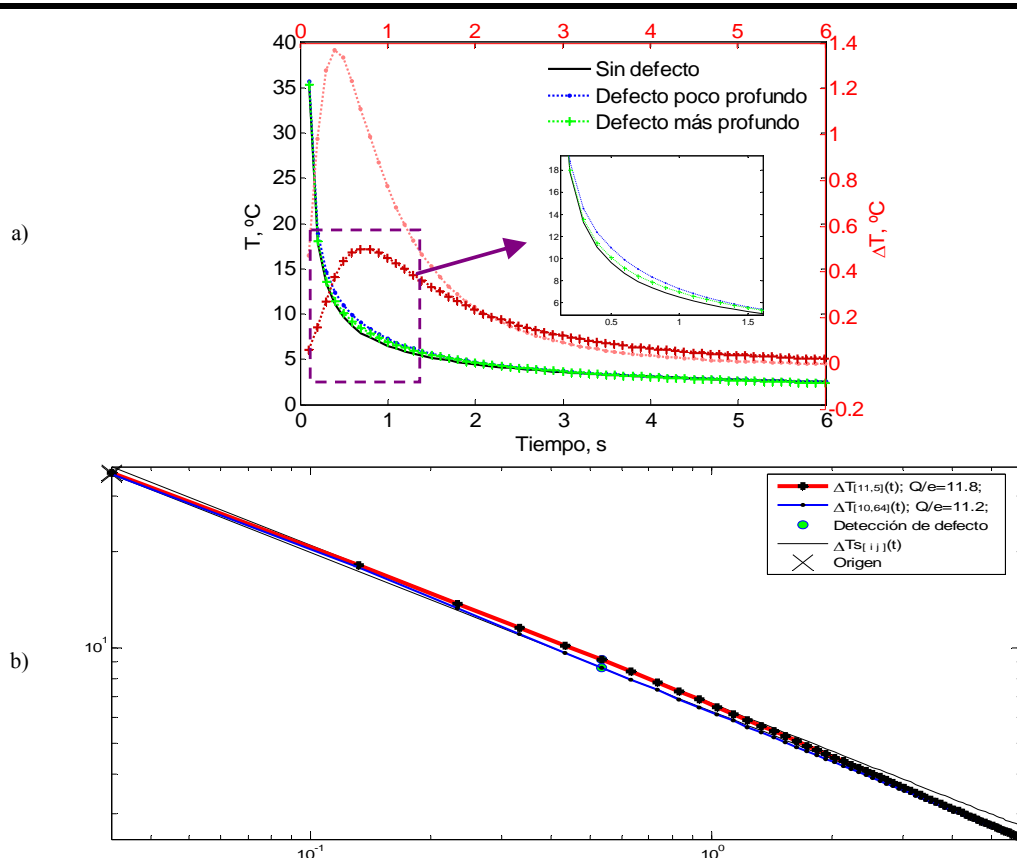


Figura 4-3. a) Detección de defectos a partir de los perfiles térmicos. Las curvas de contraste absoluto para el defecto poco profundo (·) y el más profundo (+) están representadas en colores similares al rojo para su correlación con el eje del contraste (eje derecho). b) Representación en formato bi-logarítmico de la evolución temporal de dos píxeles (rojo, en zona defectuosa; azul, en zona libre de defectos) obtenida a partir del freeware Ir-View donde se aprecia la tendencia lineal de pendiente $-\frac{1}{2}$ (línea negra). La secuencia de imágenes utilizada para esta simulación se corresponde con la presentada en la Figura 3-2 para una excitación en forma de flash de 0.01 segundos y potencia 100KW/m² sobre un material sustrato de conductividad 6.4 [W/(m*K)] en el plano normal a la superficie y 0.64 [W/(m*K)] en el plano paralelo a la misma, de capacidad térmica de 2460 [(W*s)/(kg*K)], densidad 500 [kg/(m³)] y espesor 6 mm. Los defectos considerados son taladros, con aire de conductividad 0.07 [W/(m*K)], de capacidad térmica de 928 [(W*s)/(kg*K)], densidad 1.3 [kg/(m³)], 2 mm de diámetro y a profundidades de 0.5 y 1.25 mm.

aquel que no presenta saturación^⑤. Idealmente, los defectos aún no son visibles en el PTV aunque esta condición no se cumple siempre en la práctica, especialmente, cuando se inspeccionan defectos poco profundos en materiales de alta conductividad térmica usando una frecuencia de captura de imágenes baja. Normalmente, esta situación no constituye un problema en la detección de defectos pero sí en el análisis cuantitativo de su profundidad, dado que la profundidad es función del tiempo ($z \sim t^{1/2}$) como se desprende de la ec. 4.1. Comenzando con el PTV, los siguientes termogramas resultan de interés para la detección y evaluación de los defectos internos y constituyen la secuencia termográfica válida^④. La temperatura superficial decrece hasta que se produce la estabilización térmica con el ambiente. A partir del último termograma válido (⑤UTV), las variaciones de temperatura se consideran despreciables (ruido) y ninguna información puede obtenerse de tales capturas.

La desviación con respecto al modelo idealizado por la ec. 4.1 en la parte útil de la secuencia termográfica ofrece información acerca de la presencia de áreas defectuosas como se aprecia en la Figura 4-3. La evolución temporal de la temperatura superficial de un píxel sobre un área libre de defectos sigue un

comportamiento que decae aproximadamente según la raíz cuadrada del tiempo ($z \sim t^{1/2}$). Para el resto de píxeles, aquellos en la superficie correspondientes a un área con anomalías internas, la temperatura superficial puede ser mayor o menor en ciertos instantes hasta que la estabilidad térmica es alcanzada. Por ejemplo, en la Figura 4-3, las anomalías vienen representadas por un taladro en la parte posterior de un espécimen de Plexiglas que está relleno de aire. La efusividad térmica (habilidad de un material para intercambiar calor con su entorno) es mucho mayor en el Plexiglas que en el aire [Ibarra, 2005]³³. Por ello la interfaz plexiglas-aire presenta un incremento de la temperatura superficial.

La aplicación del contraste absoluto, definido como la diferencia de temperaturas entre un píxel y otro usado como referencia (*soundarea*), provee la inmediata detección de la discontinuidad en el perfil temporal como se observa en la Figura 4-3a.

Trabajando en escala bi-logarítmica, la relación de la ec. 4.1 queda reducida a una expresión lineal de pendiente $-1/2$:

$$\ln(\Delta T) = \ln\left(\frac{Q_0}{e}\right) - \frac{1}{2}\ln(\pi t) \quad \text{ec. 4.6}$$

De nuevo, el contraste absoluto denota la presencia de una discontinuidad como se observa en la Figura 4-3b³⁴.

Esta relación lineal de la ec. 4.6 resulta de gran interés en la aplicación de la definición de contraste diferencial dada en la ec. 4.4, que permite obtener el contraste de cualquier píxel con respecto al comportamiento que debiera tener en caso de ser un píxel en una zona libre de defectos. Así, sabiendo que el comportamiento en escala bi-logarítmica tiene una evolución lineal con pendiente $-1/2$, al perfil de temperatura de cualquier píxel se le puede sustraer la temperatura dada por este modelo lineal. Además, el primer factor del segundo miembro de la ec. 4.6 ofrece información acerca de la superficie. Su tratamiento permite la eliminación de las no uniformidades que puedan afectar la experiencia. De esta forma, el uso de la técnica diferencial definida por la ec. 4.4 presenta los beneficios de no necesitar la selección de un área libre de defectos (*soundarea*); evitar los efectos de las no uniformidades térmicas en la superficie (por efecto de la excitación, diferencias de emisividades), la geometría (textura de la superficie) y ópticas (como la aplicación irregular de pinturas); y ser relativamente rápida frente al uso de transformadas de Fourier, Wavelets o Laplace al usar simples operaciones de sumas, restas, multiplicaciones, divisiones y raíces cuadradas. Estos beneficios se desprenden de la observación de la Figura 4-4.

³³ Exactamente 115 veces. La efusividad del Plexiglas es de $577 \text{ W s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$, la del aire de $5 \text{ W s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$.

³⁴ Ir-View es un software gratuito desarrollado por Maria Cristina Pilla, Xavier Maldague y Matthieu Klein en la Universidad Laval. Se puede descargar desde la página: http://www.gel.ulaval.ca/~klein/ir_view/ir_view_doc.htm

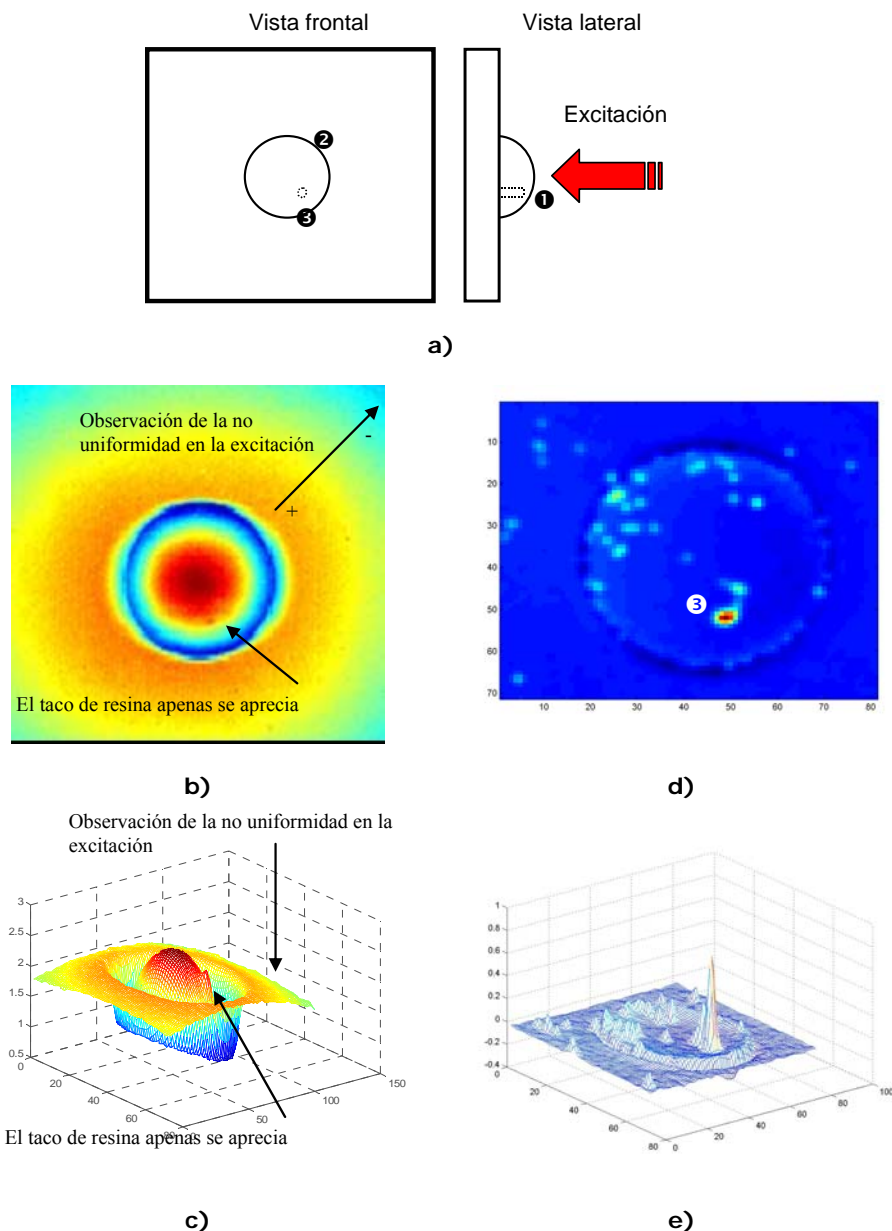


Figura 4-4. Semiesfera de Plexiglas® con un taco de resina que le sujeta a la placa que la soporta: (a) vistas frontal y lateral ; (b) termograma capturado 1.2 s después del inicio de la adquisición; (c) vista 3D (d) termograma corregido tras la aplicación del algoritmo DAC; (e) vista 3D.

● Punto de máxima energía ● círculo que marca el contacto de la semiesfera y la placa ● taco de resina (interpretable como material anómalo en el conjunto inspeccionado).

La imagen de la Figura 4-4, exhibe no uniformidades de la temperatura superficial de un espécimen provocadas por efecto de la forma y del calentamiento y su corrección o eliminación por medio del procesado DAC anteriormente descrito. En este caso particular, se trata de una semiesfera de Plexiglas adosada a una placa de igual material con un taco de resina. En el calentamiento del espécimen, el frente térmico alcanza antes y con mayor energía la parte más destacada de la semiesfera ● siendo representada por un intenso color rojo. La forma de la superficie puede ser interpretada de la observación de los termogramas iniciales como la Figura 4-4b. La no uniformidad de la

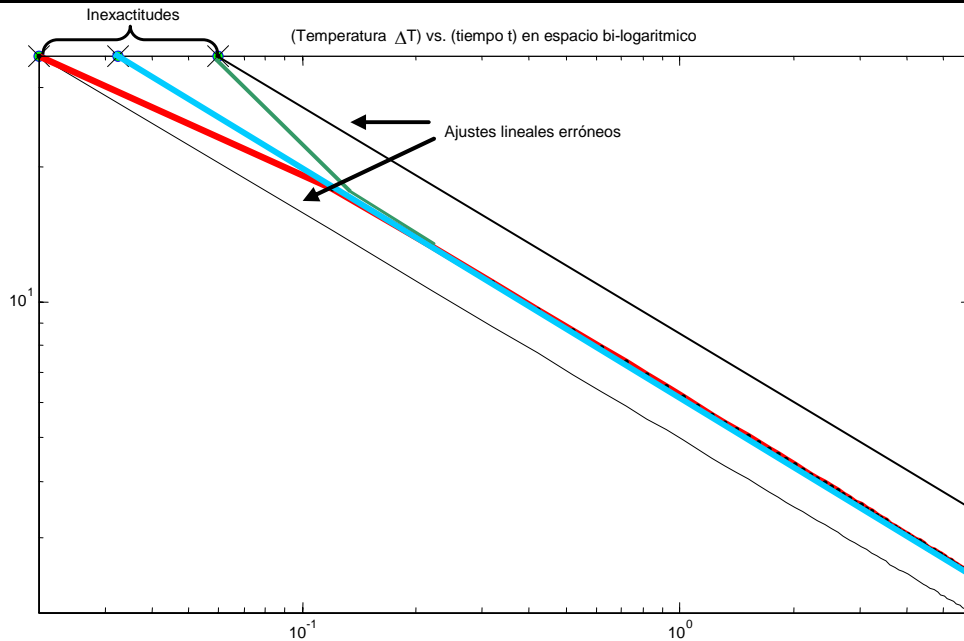


Figura 4-5. Incertidumbre causada por la inexactitud del tiempo de inicio de la captura. El tiempo correcto es 0.031s (línea azul) mientras que las otras líneas denotan capturas donde el tiempo inicial no ha sido correctamente ajustado. Obviamente, estos errores influyen en el resultado de aplicar el método DAC (línea de trazo más fino) que ofrece una tendencia lineal de pendiente $-1/2$ a partir del valor inicial.

excitación también es palpable como se observa del gradiente térmico captado en la misma Figura 4-4b. El frente térmico no afecta las zonas más ocultas del objeto y viene representado por las zonas de azul oscuro en las imágenes. Se corresponden con el borde de contacto entre la semiesfera y la placa que la soporta ②. La profundidad relativa es el factor dominante en este tipo de experiencias. La profundidad de un defecto interno, bien en la placa bien en la semiesfera, debiera ser considerada respecto a la superficie. En este caso, el efecto de la forma debe ser eliminado. Como se observa en la Figura 4-4 d y e, el procesado DAC elimina esta influencia dejando en evidencia los defectos, particularmente un taco de resina ③.

Sin embargo la limitación más importante de la aplicación del método DAC radica en la incertidumbre del instante que el pulso térmico alcanza la superficie del material. La Figura 4-5 denota los problemas y la pérdida de información que provoca el incorrecto ajuste del tiempo de referencia $t_{i,ef}$ de las ecuaciones del DAC. En el caso de un ajuste o conocimiento preciso del tiempo en el que el pulso térmico alcanza la superficie del objeto, se observa cómo el modelo lineal de pendiente $-1/2$ propuesto por el método DAC aproxima perfectamente la variación temporal de la temperatura superficial de un área libre de defectos. Sin embargo, pequeñas variaciones en la escala del tiempo pueden equivocar el modelo. Hay que recordar que la captura de imágenes impone una nueva referencia temporal como se aprecia en la Figura 4-2. El tiempo de llegada del pulso térmico se encuentra entre dos tiempos de captura, siempre y cuando no se tengan los termogramas saturados. En ese caso se han de eliminar dichas capturas y la referencia temporal inicial adquiere valores mayores donde el proceso de difusión dificulta la cuantificación de la profundidad o la forma del defecto.

La importancia de una correcta temporalidad de la captura en los primeros instantes tras la excitación resulta de gran trascendencia para la detección de defectos poco profundos y la inspección de materiales de alta conductividad térmica. Las secuencias pueden ser corregidas temporalmente conociendo las tendencias que deben seguir. Sin embargo, la intervención de un operador es requisito imprescindible para ello. Ante una automatización del proceso, dos frentes pueden definirse en el tratamiento de esta problemática. Por una parte, el desarrollo de grandes sincronismos en los sistemas (entre fuente de excitación y cámara), con el conocimiento detallado de la forma del pulso de excitación, su temporalidad y la distancia fija entre la muestra y la fuente de calor, permite capturas “puras” y sin los inconvenientes antes mencionados. Un ejemplo de esta tendencia es el desarrollo de sistemas compactos (“todo en uno”) como el sistema termográfico EchoTherm® comercializado por TWI Inc. y basado en cámara de infrarrojo Merlin y en un sistema de flashes como excitación. Por otra parte, ante el uso de sistemas modulares donde el sincronismo es más complicado, se persigue el modelado de las capturas para extraer de forma inversa información de los instantes iniciales tras la excitación. Esta última parte es la que nos permite la automatización de los procesos de detección de defectos internos en secuencias termográficas.

A lo largo de este capítulo se realizarán los estudios de diferentes alternativas que permitan la identificación del patrón lineal visto hasta ahora en las secuencias termográficas. Para ello se analizará una secuencia termográfica determinada, obtenida por una cámara Santa Barbara modelo SBF125 tras una excitación pulsada estimulada durante 15 ms por flashes (Balcar FX60) sobre un espécimen de Plexiglas de 4 mm de espesor, dimensiones 15x15 cm y que contiene 6 taladros en su parte posterior de 10 mm de diámetro y profundidades 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 mm (indicadas desde la superficie frontal). Además de un esquemático del espécimen, la Figura 4-6 muestra una selección de termogramas para su comparación con los resultados que se ofrecen a continuación.

4.1.2 La problemática del ajuste de una línea recta

Se ha observado la necesidad de ajustar una ecuación matemática lineal o modelo lineal al conjunto de datos experimentales obtenidos de la secuencia termográfica. Se ha comprobado cómo, eliminando la tendencia lineal de la representación bi-logarítmica del contraste térmico en función del tiempo, los defectos son detectables, las no uniformidades térmicas tanto de la excitación como de la emisividad evitables y una automatización del proceso de detección y evaluación posible. La identificación del patrón lineal en estas representaciones puede resolverse mediante algorítmicas ya conocidas pero cuya aplicación se circunscribe a técnicas de estimación estadística y a técnicas de identificación de formas en tratamiento de imágenes. La fusión de estas técnicas con la experiencia en laboratorio y en campo de la termografía posibilita la automatización de la detección y evaluación de defectos internos en materiales homogéneos.

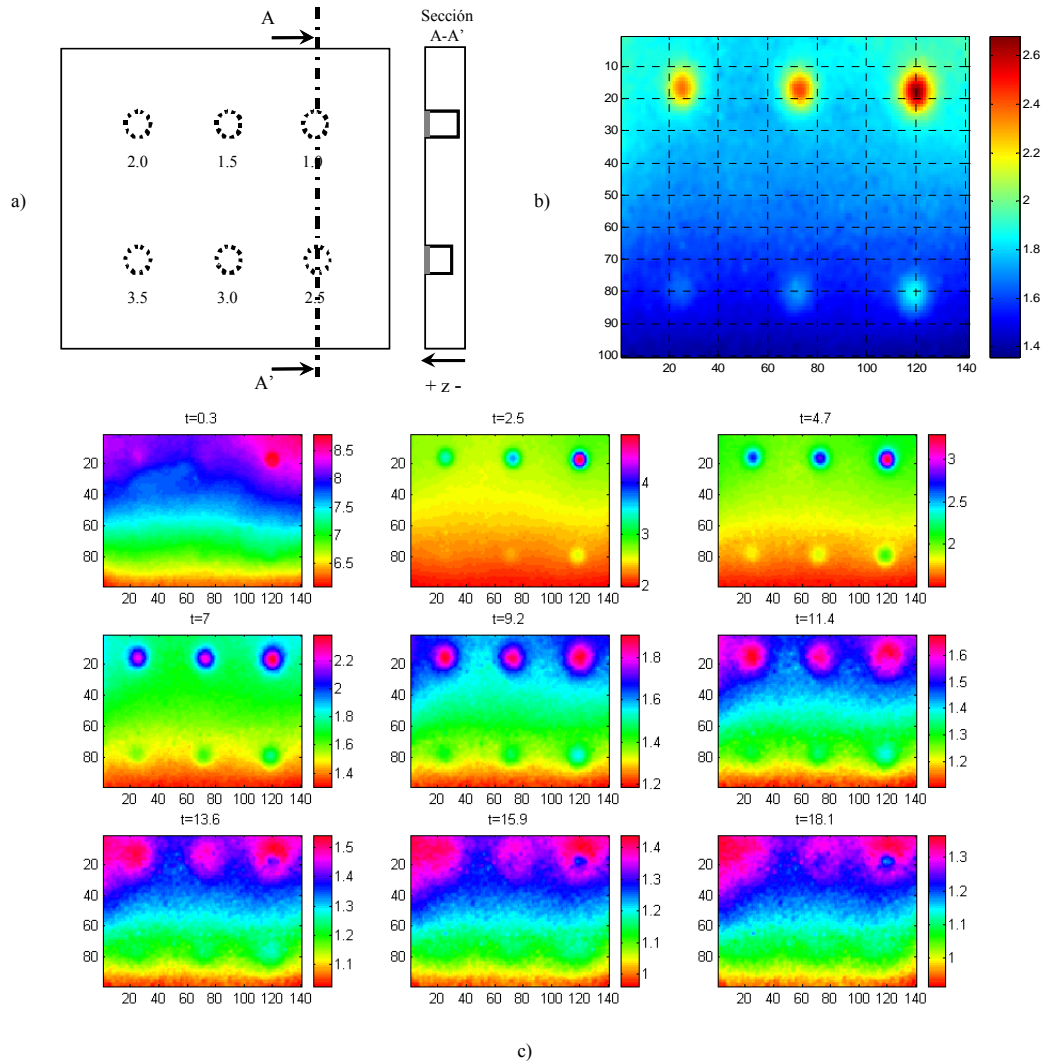


Figura 4-6. a) Esquema del espécimen usado. Placa de Plexíglas 150x150x4mm con 6 defectos artificiales de 10mm de diámetro a las profundidades marcadas considerándolas desde la superficie b) Termograma para la posición de los píxeles presentados y observación de una clara no uniformidad en el calentamiento. Tratándose del tercer termograma, uno de los defectos (el menos profundo) ya es visible en las coordenadas [18,120]. b) Secuencia termográfica capturada. La no uniformidad es patente al igual que el efecto de la difusión en función del tiempo de captura de los termogramas mostrados (en segundos).

4.2 Métodos estadísticos

El ajuste estadístico de una línea recta se conoce generalmente como regresión lineal, en donde la palabra regresión tiene tan sólo un significado histórico. Bajo condiciones ideales, el método de los mínimos cuadrados es el preferido para ajustar ecuaciones teóricas a un conjunto de datos experimentales. La suma (ponderada) de los cuadrados de los residuales —desviaciones con respecto a la función de ajuste—, se hace tan pequeña como sea posible. Un criterio de mínimos cuadrados (ponderados) es válido si es posible asumir: *i*) que los errores cometidos son aleatorios y no sistemáticos, con media cero y varianza no uniforme; *ii*) que siguen una distribución gaussiana; esta distribución es tan común que nos referimos a ella como normal; *iii*) que la variable independiente, i.e., x , la abscisa, se conoce exactamente o puede ser establecida (fijada) por el experimentador; *iv*) que las observaciones y_i son estadísticamente independientes, esto es, no se encuentran correlacionadas, coincidiendo las

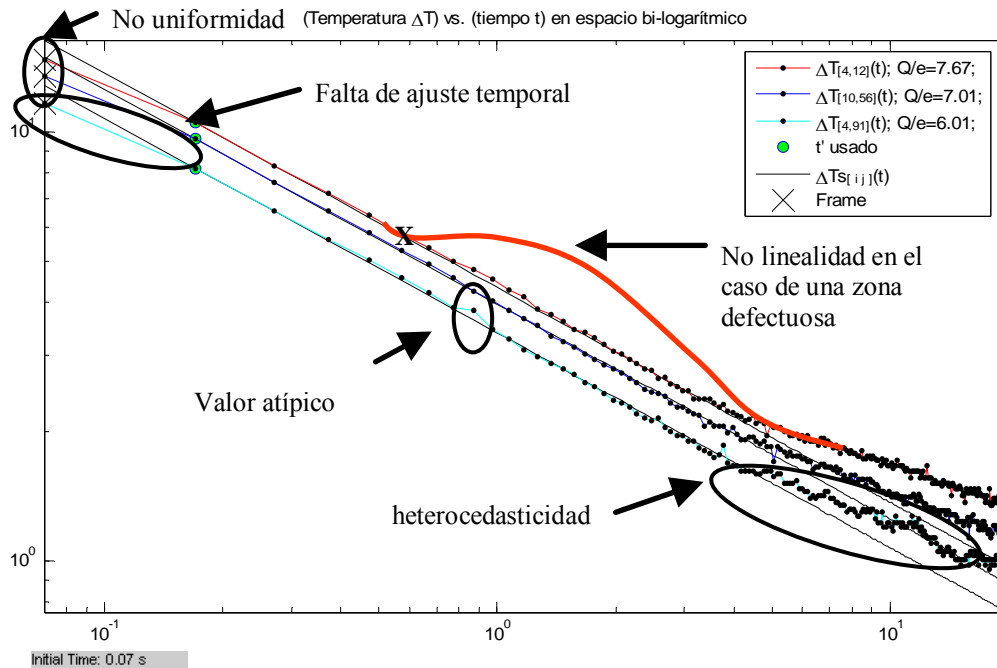


Figura 4-7. Problemas comunes en el ajuste de tendencias temporales de la temperatura correspondiente a un píxel en una secuencia termográfica. Estos problemas dificultan el uso de técnicas de regresión lineal para la obtención del comportamiento modélico lineal de pendiente $-\frac{1}{2}$ de tales evoluciones temporales: a) píxel sobre un área defectuosa; b) píxel sobre un área libre de defectos

medias con sus respectivas expectativas o verdaderos valores; y v) que los pesos correctos, números positivos, son conocidos; esto requiere conocer, a su vez, la forma funcional de la dependencia de x con la varianza de y . El criterio de los mínimos cuadrados da lugar, no obstante, a resultados cuestionables si las observaciones no se ponderan correctamente o si los datos contienen resultados atípicos.

Existen casos en los que el método de mínimos cuadrados no resulta efectivo. Básicamente, al ajustar un modelo de regresión lineal simple se pueden presentar diferentes problemas bien porque no existe una relación lineal perfecta entre las variables o porque no se verifican las hipótesis estructurales que se asumen en el ajuste del modelo. Estos problemas son los siguientes:

- Falta de *Linealidad*, porque la relación entre las dos variables no es lineal o porque variables explicativas relevantes no han sido incluidas en el modelo.
- Existencia de *valores atípicos* e influyentes (*outliers*), existen datos atípicos que se separan de la nube de datos e influyen en la estimación del modelo.
- Falta de *Normalidad*, los residuos del modelo no se ajustan a una distribución normal.
- *Heterocedasticidad*, la varianza de los residuos no es constante.
- Dependencia (*autocorrelación*), existe dependencia entre las observaciones.

La Figura 4-7 recoge una evolución típica del contraste térmico de un píxel superficial durante una inspección con termografía activa pulsada representada en un gráfico bi-logarítmico. Varios de los problemas anteriormente

mencionados son claramente reconocidos y los métodos de regresión por mínimos cuadrados sólo ofrecen buenos resultados en casos muy puntuales y en condiciones muy poco frecuentes. Por una parte, un ligero error de control temporal de las capturas de la cámara provoca la aparición de valores atípicos que dificultan la regresión lineal de la evolución. En una escala logarítmica, unas décimas de milisegundos resultan una o más observaciones que no siguen la misma pauta que el resto de los datos y ejercen una gran influencia sobre el modelo de regresión. La detección y el rechazo de datos anómalos, en particular, no es apropiada dado que la mayor parte de la información aparece en los instantes posteriores más inmediatos a la excitación como se desprende del apartado anterior. Por otra parte, el nivel de ruido resulta comparable a la señal en tiempos de inspección donde la difusión es patente. La cantidad medida no tiene así varianza constante (homocedástica) sino que es dependiente del tiempo en el que ocurre (caso general de precisión no uniforme o heterocedasticidad).

Una alternativa, para la obtención de la recta que ajuste el modelo de la evolución temporal del contraste térmico superficial, es usar procedimientos estadísticos que sean robustos frente a los datos atípicos y la heterocedasticidad (un método robusto no es sensible a desviaciones moderadas de supuestos estadísticos).

4.2.1 Automatización IDAC³⁵

Las ventajas de la aplicación del contraste diferencial (DAC) permiten el modelado de los perfiles de evolución temporal de la temperatura de la superficie de cualquier objeto homogéneo bajo excitación térmica pulsada. Se obtienen los valores de la energía térmica cedida a la superficie en cada punto de la misma, ajustando las curvas obtenidas para cada píxel a una función lineal de pendiente $-1/2$, en una representación bi-logarítmica, y reduciendo los errores producidos por las inexactitudes de la estimación del tiempo en el que se produce la primera captura válida respecto a la llegada del pulso térmico a la superficie. Con ello, se logra la corrección de la no uniformidad en el calentamiento y evitar los efectos de la forma u orientación de la superficie favoreciendo la detectabilidad de los defectos internos y la estimación de su profundidad. El método DAC resulta exitoso bajo su aplicación por un experto en la materia.

Una automatización del método del contraste diferencial es la detección, mediante técnicas de interpolación, de la recta de pendiente $-1/2$. A partir de la misma, se obtiene el valor del tiempo inicial (el de contacto del pulso térmico con la superficie del material) y de la energía suministrada a la superficie en él. Las secuencias termográficas son interpretadas como matrices de tres dimensiones recogiendo la evolución temporal de una imagen inicial. Para cada píxel de la imagen, el algoritmo IDAC (Interpolated Differentiated Absolute Contrast Algorithm) evalúa las diferentes combinaciones de puntos a lo largo del perfil temporal de la temperatura (tercera dimensión en las matrices IDAC) en los que

³⁵ Interpolated Differentiated Absolute Contrast Algorithm: Propuesto por el autor de esta obra y colaboradores y por primera vez presentado en el congreso QIRT, 2004 celebrado en Bruselas [Gonzalez, 2004-Qirt]

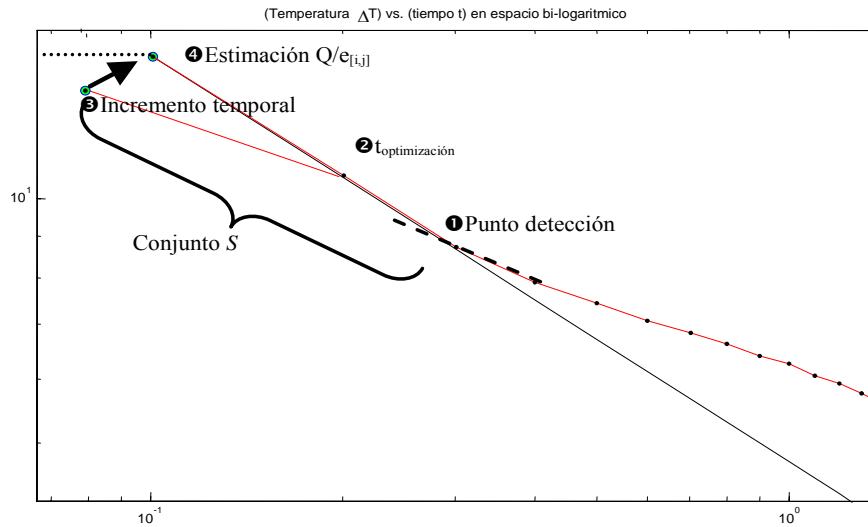


Figura 4-8. Secuencia de pasos del algoritmo IDAC: ❶ Punto de detección (primer punto con pendiente mayor de un determinado umbral) ❷ Tiempo de optimización (interpolación entre puntos del conjunto S cuya pendiente más se aproxime a -0.5) ❸ Una función de minimización es implementada obteniendo el δt óptimo que mejor correlación ofrece. ❹ Estimación de $Q/e_{[i,j]}$ según ec. 4.6.

la pendiente no se desvía de un valor dado (-0.35 es considerado empíricamente un umbral apropiado). En el momento en el que la pendiente rebasa el umbral determinado, se considera que ese punto del perfil temporal es el comienzo de la detección de un defecto, ver en la Figura 4-7 el frame representado por un aspa grueso o la Figura 4-8 ❶. Interpolando linealmente combinaciones del conjunto de puntos desde el primer punto del perfil hasta el punto de comienzo de la detección (conjunto de puntos S), se evalúa la pendiente de la línea interpolada generada para el conjunto de los datos temporales S. Tras agotar las combinaciones, el algoritmo evalúa la combinación que mejor interpolación realiza, obviamente aquella interpolación cuya pendiente más se aproxime a $-1/2$. Una vez encontrada la mejor interpolación, se define el tiempo que la origina como $t_{optimización}$ ❷. Los puntos en el rango temporal $[t_0, t_{optimización}]$ son comparados con los obtenidos tras aplicar la interpolación optimizada. Se añade un tiempo δt a t_0 ❸. Una función de minimización es implementada obteniendo el δt óptimo que mejor correlación ofrece. De esta forma, la estimación de $Q/e_{[i,j]}$ ❹ en la ec. 4.6 permite la corrección de las no uniformidades.

La Figura 4-9 muestra una imagen única resultado de aplicar el algoritmo IDAC a la secuencia presentada en la Figura 4-6. En sólo una imagen, todos los defectos detectables son mostrados. El método IDAC mantiene un ligero error en la eliminación de la no-uniformidad del calentamiento, manteniendo el nivel de soundarea en una escala de -0.1°C y presentando los perfiles de temperatura ligeramente desplazados respecto a los del DAC. A pesar de esto, los mismos defectos son observables y la correlación del valor dado por la imagen y la profundidad es alta.

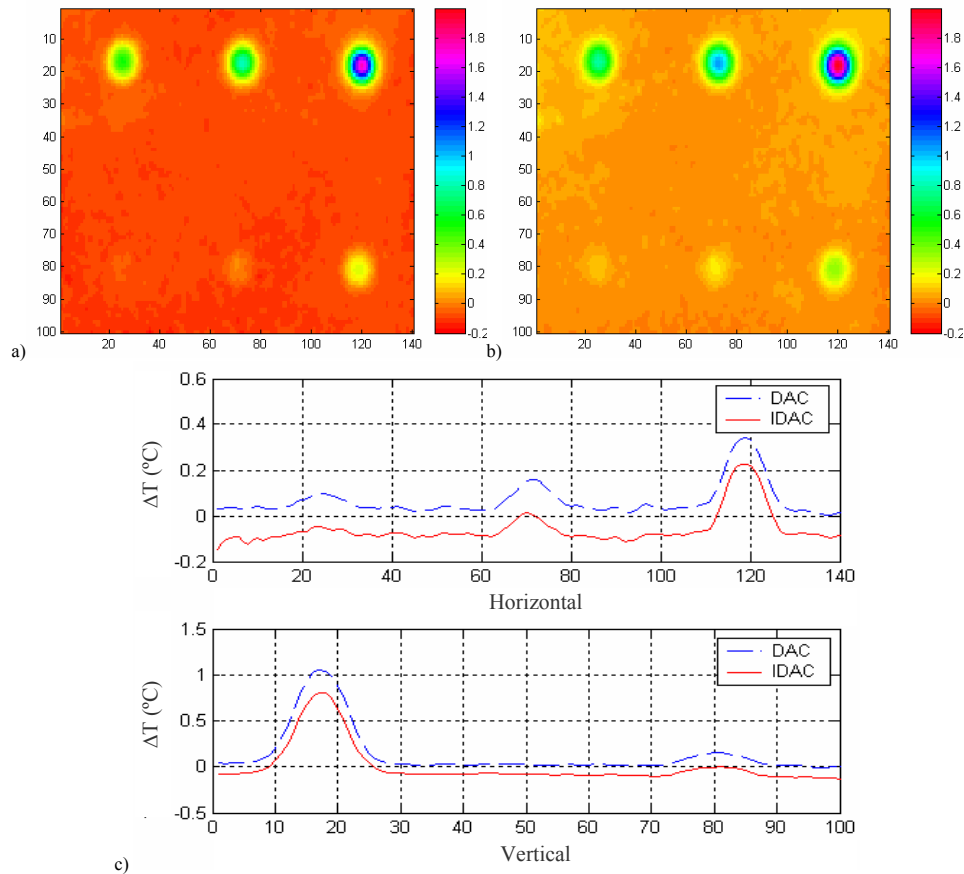


Figura 4-9. Imágenes únicas obtenidas tras la aplicación de los algoritmos a) IDAC b) DAC. c) Perfiles horizontal y vertical en el píxel 80 y píxel 72 respectivamente. Los dos métodos detectan los mismos defectos.

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:

$$z = A \cdot t_{\max}^{1/2} \cdot C_{\max}^h \quad \text{ec. 4.7}$$

donde los parámetros A y h se determinan por regresión. Así la profundidad puede ser estimada a partir del valor ofrecido por la automatización IDAC [Gonzalez, 2004-Odimap].

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. Sobel, Roberts, Canny, etc. El principal problema es determinar el instante más adecuado para esto. Por ejemplo, podría obtenerse una estimación del diámetro de los defectos según el contraste medio (la mitad del contraste máximo o FWHM) [Avdelidis, 2003].

Con los beneficios vistos por el uso de la definición de contraste diferencial de la ec. 4.6, el operador sólo ha necesitado definir la matriz secuencia termográfica sobre la que aplicar el algoritmo.

4.2.2 Métodos robustos de estimación estadística aplicados a la termografía infrarroja.

En la estadística «no paramétrica», se describen una variedad de métodos robustos de regresión, válidos frente a incumplimientos de las suposiciones clásicas. Tales herramientas requieren sólo simples suposiciones, tales como aleatoriedad e independencia. La suposición de independencia implica que las perturbaciones son independientes unas de otras y no correlacionadas con alguna variable, esto es, es un ruido incorrelado y aleatorio.

Los métodos robustos son menos exactos que la estimación por mínimos cuadrados cuando las suposiciones de éstos son ciertas, pero más exactos cuando son falsas. La clase de métodos robustos frecuentemente utilizados para la estimación lineal son los denominados *métodos de información mínima*. Se trata de utilizar un subconjunto mínimo de las medidas disponibles para realizar la estimación. Se basan en la hipótesis de que si se encuentra un subconjunto suficientemente preciso, el resto de medidas pueden ser ignoradas y de esta forma se evita que medidas erróneas puedan afectar negativamente a la estimación. Para seleccionar el mejor subconjunto se utiliza algún tipo de *clustering* o criterio de consenso, esto es, si la estimación sugerida por un subconjunto también explica una parte significativa del resto de medidas, entonces es muy probable que la estimación sea correcta y puede ignorarse el resto de medidas.

El método más representativo es la familia de algoritmos de regresión de RANSAC (Random Sample Consensus) [Fischler, 1981]. En el anexo E puede consultarse una sección que describe esta familia de algoritmos. Al igual que la automatización IDAC, esta familia de algoritmos es capaz de obtener la línea recta que ajusta los datos temporales del contraste diferencial aún con las dificultades de tener valores atípicos, heterocedasticidad, ruido y no linealidad. En la Figura 4-10 se aprecia un ejemplo del correcto ajuste ofrecido por estos algoritmos.

4.3 Transformaciones en el espacio de datos

Para la obtención de la recta que ajuste el modelo de la evolución temporal del contraste térmico superficial se pueden usar tanto procedimientos estadísticos como técnicas que resultan de la aplicación directa de técnicas de identificación de patrones lineales en imágenes, tratamiento de imagen y que se basan en métodos de acumulación de ocurrencias. El reconocimiento de líneas rectas es una tarea fundamental en el campo de procesamiento de imágenes y varias transformadas han sido desarrolladas y validadas para ello. Entre ellas destacan la transformada Hough y la transformada Radon teniendo en común la transformación del espacio original en un espacio paramétrico o transformado donde las líneas rectas son fácilmente detectables.

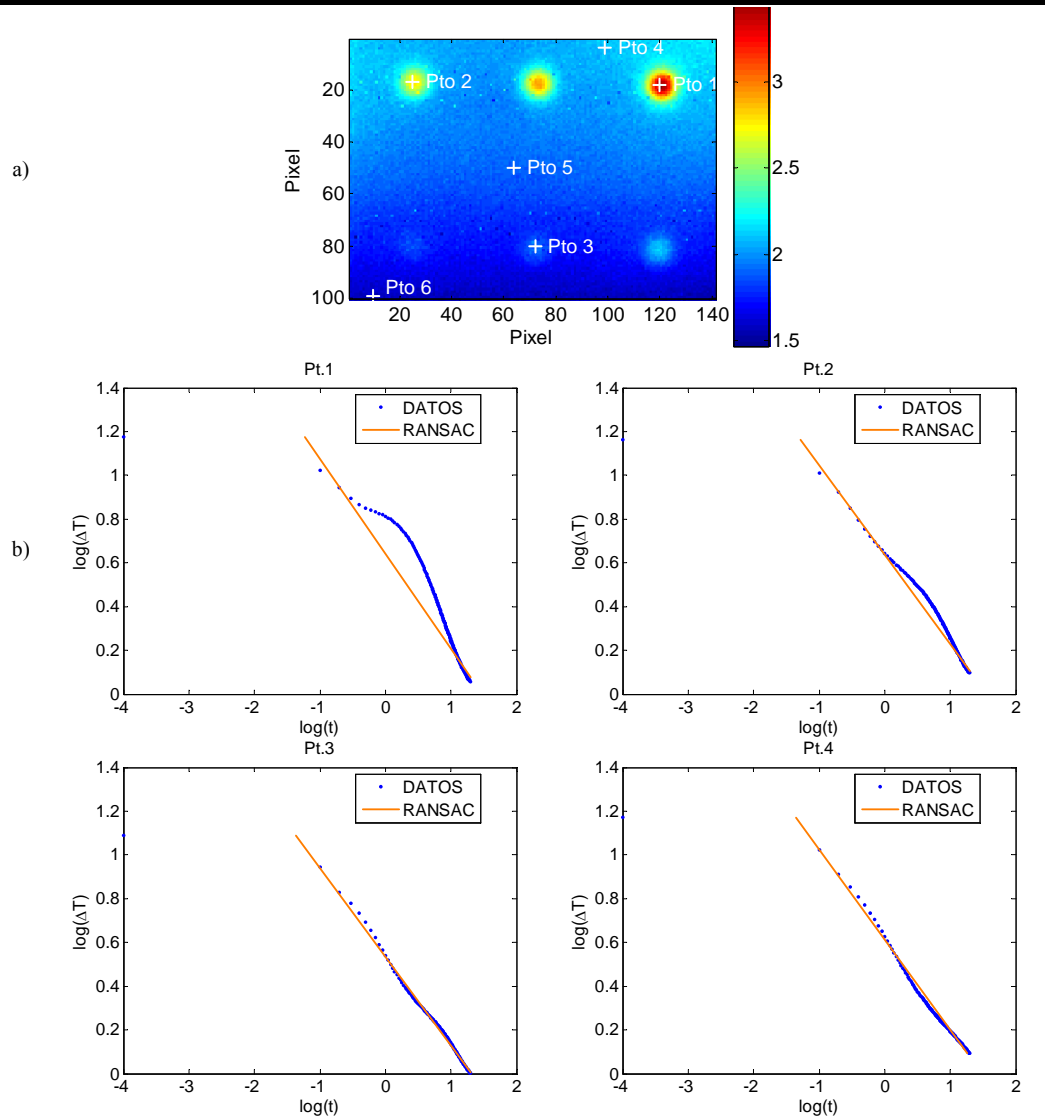


Figura 4-10. Ajuste al modelo de pendiente $-\frac{1}{2}$ a partir de algoritmos de la familia RANSAC. a) Situación de los diferentes puntos b) Ajuste de la tendencia temporal de cada punto seleccionado en a)

4.3.1 Transformada Hough³⁶

La transformada Hough se utiliza para el enlace de puntos de borde y la extracción de rectas. Para solucionar el problema anteriormente planteado de la identificación de un patrón lineal en la representación bi-logarítmica de la temperatura superficial de un espécimen tras una excitación pulsada, se usa la transformada de Hough [Hough, 1962]. Implica la transformación de coordenadas cartesianas a coordenadas polares de la forma:

$$\rho = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta \quad \text{ec. 4.8}$$

para cada punto $q=q(x,y)$ de un conjunto Q de puntos donde ρ es la distancia perpendicular de la línea al origen, y θ es el ángulo entre la normal de la línea y el eje x , como aparece en la ilustración del anexo dedicado a los diferentes

³⁶ Pulsed Thermography Hough Transform Algorithm, PHTTA: Propuesto por el autor de esta obra y colaboradores y por primera vez presentado en el congreso IWASPND, 2005 celebrado en Québec [Gonzalez, 2005-IWASPND]

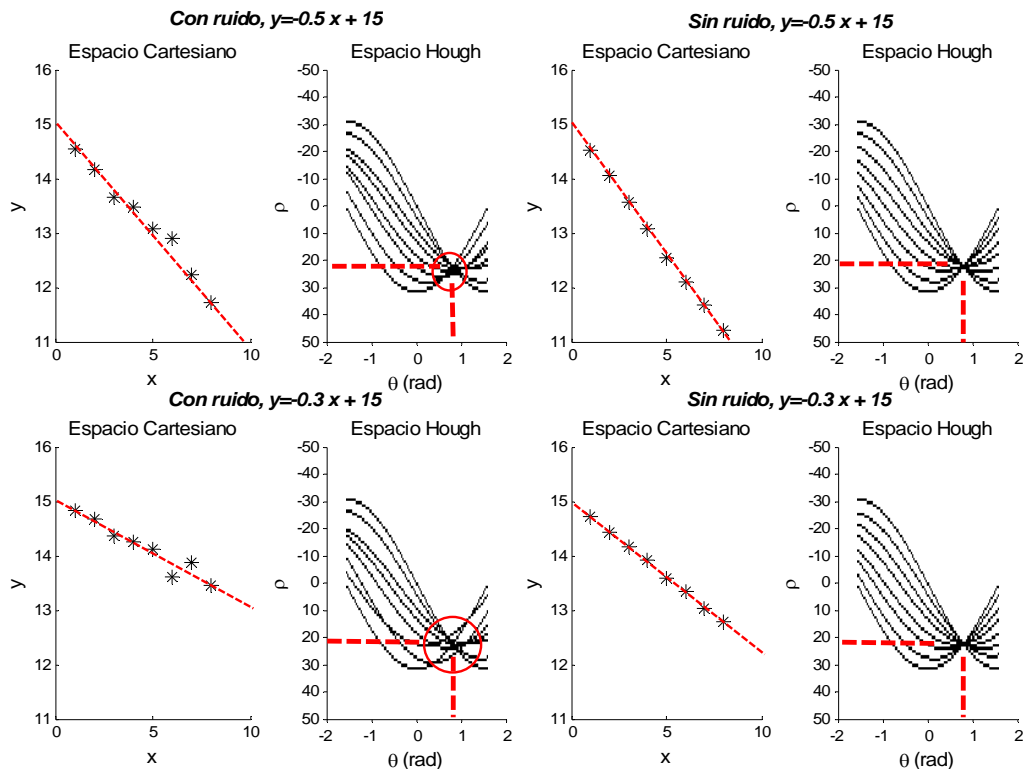


Figura 4-11. Representación de la transformación de varias líneas de pendientes -0.5 y -0.3 en situaciones donde son o no afectadas por ruido aleatorio. Se observa cómo el efecto del ruido en el espacio transformado se corresponde con un emborronamiento de la zona de corte de las curvas sinusoidales, mientras, para el caso de rectas sin ruido, el corte se realiza en un único punto bien definido como se observa en el gráfico de la derecha.

algoritmos aquí tratados. Se acumulan las parejas (p) de los valores discretos de la curva $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$ en el espacio de parámetros P y entonces se detectan los picos más destacados en este espacio (ver, por ejemplo, [Gonzalez, 1993]; [Pratt, 1991]).

Para cada punto del espacio xy , podrán pasar infinitas rectas por ese punto y así una curva sinusoidal es generada en el acumulador que forma el espacio transformado, ver la Figura 4-11. Si representamos esta función transformada para todos los puntos de una recta, estas curvas sinusoidales se cortarían todas en un punto que nos definirá la ecuación de la recta. Como el mayor conjunto de puntos alineados que contiene el gradiente corresponde a la recta de interés, el punto más brillante en el plano de Hough corresponderá a los valores de ρ y θ de dicha recta. De esta forma, observando el valor de θ en el cual se da el máximo de la transformada de Hough, se obtiene el valor del ángulo de inclinación buscado. Aún siendo una “línea ruidosa”, la intersección de las curvas representa la línea aunque la zona de corte ya no sea un único punto sino un área.

A partir de esta base teórica, se construye un método de detección de rectas en imágenes enormemente robusto, (Pulsed Thermography Hough Transform Algorithm, PTHTa) [Gonzalez, 2005-IWASPND]. Puntos de ruido en la imagen, o rectas no continuas, no influyen demasiado en la matriz de transformación, por lo que el algoritmo es muy robusto frente a estos aspectos. El algoritmo consiste en aplicar la transformación para todos los puntos de una

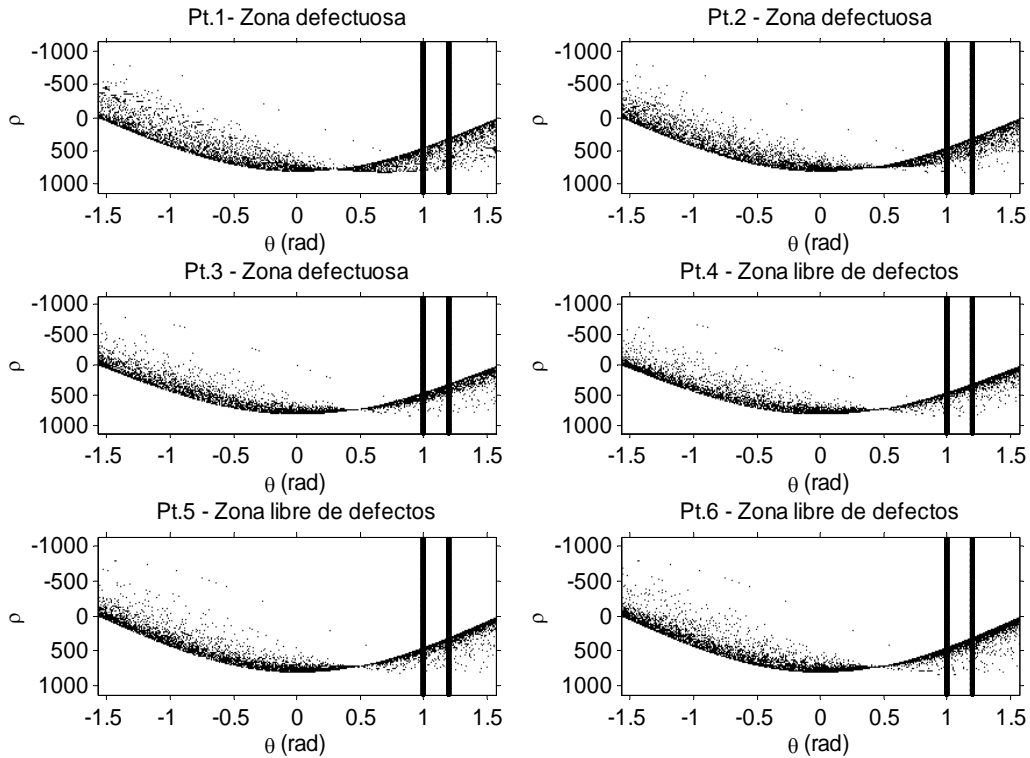


Figura 4-12. Espacio paramétrico de Hough para los perfiles temporales de los puntos seleccionados en la Figura 4-10. Los puntos 1, 2 y 3 representan zonas con un defecto interno mientras que los puntos 4, 5 y 6 representan zonas libres de defectos o soundareas. Los gráficos son similares aunque difieren en una observación más detallada de la zona limitada por barras verticales. En dicha región, $1 < \theta < 1.2$ las curvas se ensanchan estando presentes en un mayor rango de ρ para los gráficos pertenecientes a zonas defectuosas.

imagen que es el perfil de evolución temporal de la temperatura de un píxel superficial del objeto bajo inspección. El espacio transformado se discretiza, de forma que tengamos una buena resolución, y las funciones sinusoidales resultantes de la transformación de cada píxel se van acumulando. Al final del proceso, tendremos una matriz cuyo valor máximo nos dará en sus índices, el valor de ρ y θ que definen la recta.

El inconveniente principal de esta transformada es que no es capaz de encontrar los extremos de la recta. Esto afecta a la eliminación de las no uniformidades de excitación y forma de la superficie. Sin embargo, la detección de los defectos sigue siendo posible.

En la Figura 4-12 se muestran los espacios de Hough para la evolución del perfil de temperatura con el tiempo de los píxeles seleccionados en la Figura 4-10a. Cada punto de cada perfil es transformado en una curva sinusoidal como las mostradas en la figura. La intersección de todas esas curvas describe la existencia de una recta en el perfil. Sin embargo, asumiendo un material semi-infinito y homogéneo, el objetivo no es, en este caso, identificar la línea en el perfil temporal, lo que supondría un ajuste similar al ofrecido por los métodos estadísticos previamente comentados. El objetivo es simplemente la decisión de si un píxel pertenece a una zona defectuosa o no. Para ello, estimar la cantidad de puntos del perfil que siguen la pendiente de $-1/2$ resulta suficientemente determinante. Como se desprende de la Figura 4-10, los puntos del perfil temporal de los píxeles de zonas libres de defectos que siguen la pendiente dada

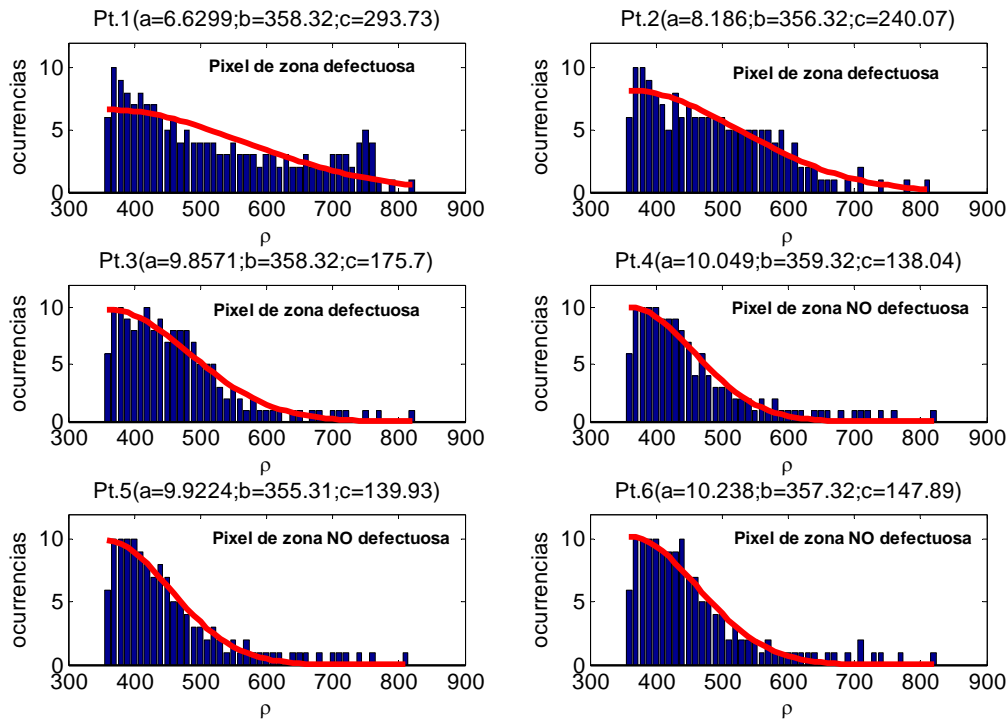


Figura 4-13. Histograma de los valores presentes en la columna $\theta \approx 1.107$ rad de la cada gráfico de la Figura 4-12. Una función exponencial, $\text{fit}(x) = a \cdot \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{c}\right)$, ajusta el histograma con los coeficientes mostrados en el título de cada gráfico. Se observa fácilmente la correlación de los coeficientes a y c con la característica de pertenecer a una zona defectuosa o no al igual que con la profundidad del defecto en el caso de píxeles de zonas defectuosas.

son numerosos. Sin embargo, el número de estos puntos en las zonas defectuosas depende de cuán rápido aparece el defecto, esto es, de la profundidad a la que se encuentra.

La ec. 4.8 puede ser reescrita de la forma $y=mx+b$ siendo $m=-\cos(\theta)/\sin(\theta)$. Por lo tanto, para los puntos que siguen una pendiente $m=-0.5$ la información en el espacio transformado de Hough reside en la columna de $\theta \approx 1.107$ rad. De ahí que en la Figura 4-12 se haya mostrado limitada una región $1 < \theta < 1.2$.

Si todos los puntos de la evolución temporal de un píxel siguen una línea de pendiente $m=-0.5$, lo que debiera verse en la representación del espacio paramétrico de Hough es una intersección pura de todas las curvas en sólo un punto de la columna $\theta \approx 1.107$ rad. La coordenada ρ para esa intersección daría el offset de la recta. De otra forma, existen tantas intersecciones en esa columna como líneas de pendiente $-1/2$ y de diferentes offsets en la evolución de la temperatura. Por lo tanto, analizando la distribución de los puntos de intersección de la columna $\theta \approx 1.107$ rad, es posible saber si el píxel se corresponde a un área libre de defectos (implicará una distribución afilada con pocas intersecciones y todas cercanas al mismo valor de offset) o a una zona defectuosa (distribución de las intersecciones más extendida, más cuanto menos profundo se halle el defecto). En la Figura 4-13 se muestra un histograma de las ocurrencias de la matriz transformada de Hough en función de ρ para los mismos píxeles de la Figura 4-12. A su vez, el histograma es ajustado mediante una función

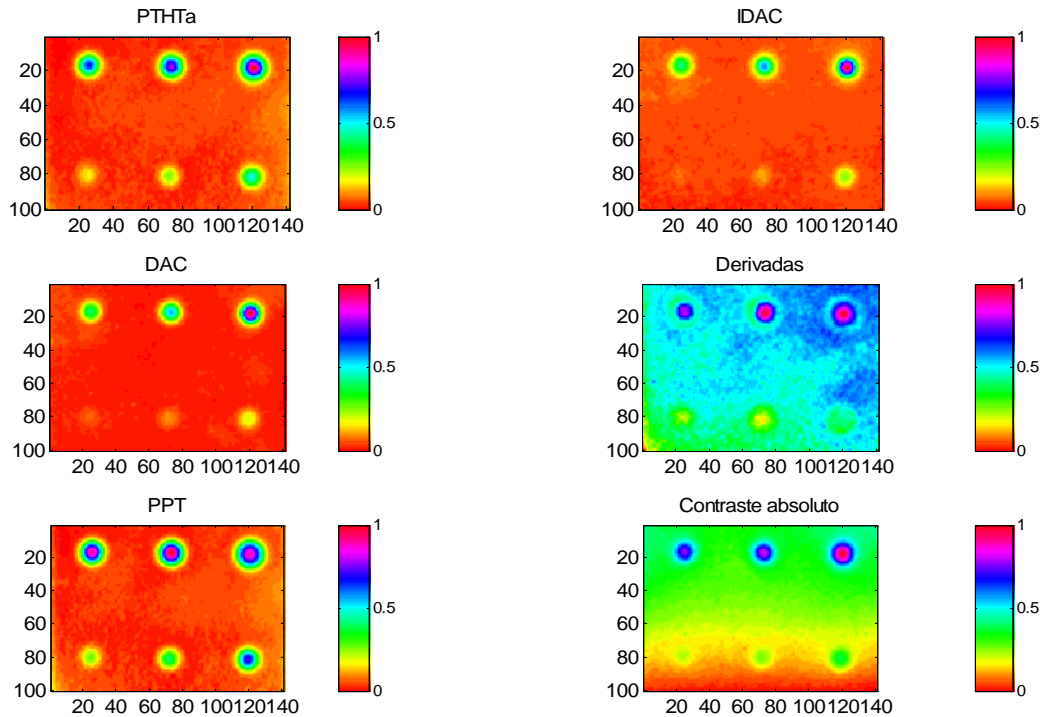


Figura 4-14. Comparativa de diferentes métodos de análisis de secuencias termográficas aplicadas al espécimen propuesto en la Figura 4-6. Las imágenes de mejor contraste son presentadas para los métodos: a) algoritmo PHTT b) algoritmo IDAC c) método DAC d) la mejor entre primera y segunda derivadas e) método PPT f) contraste absoluto (imagen de contraste respecto al valor medio de una ventana de 20x20 en el centro de la imagen). Los diferentes valores dados por cada algoritmo han sido escalados entre 0 (valor mínimo) y 1(valor máximo)

exponencial $\text{fit}(x) = a \cdot \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{c}\right)$ cuyos parámetros son expuestos en el título de cada gráfico. Como se observa, bien con el coeficiente a bien con el coeficiente c , cada píxel muestra una correlación entre el ajuste y la existencia o no de defecto, así como su profundidad en caso de pertenecer a una zona defectuosa. Representando cualquiera de estos coeficientes para cada píxel de la captura termográfica se obtiene una única imagen donde se aprecian claramente los defectos presentes, ver Figura 4-14.

La Figura 4-14 representa una comparativa entre los diferentes métodos de análisis de secuencias termográficas aplicadas al espécimen propuesto en la Figura 4-6. Muestra las imágenes de mejor contraste para cada método. Éstos son clasificados de la siguiente forma: i) métodos automatizados (algoritmo PHTTa, algoritmo IDAC); ii) métodos basados en contrastes (método DAC y método de contraste absoluto); y iii) otros métodos destacables entre los introducidos en el anexo D (la mejor imagen del método de primera y segunda derivadas [Martin, 2003] y el método PPT [Maldague, 1996] [Ibarra, 2005]).

Los resultados de la aplicación del algoritmo PHTTa son comparables a los obtenidos utilizando otras metodologías. Con respecto al otro método automatizado presentado, el IDAC, computacionalmente requiere mayor potencia y coste pero provee imágenes de mejor contraste mostrando defectos más profundos. Sin embargo, la difusión es patente en los bordes de los defectos aunque inferior a los métodos derivativos. Computando una correlación bidimensional de las imágenes obtenidas, se tienen valores de 0.93 lo que da una

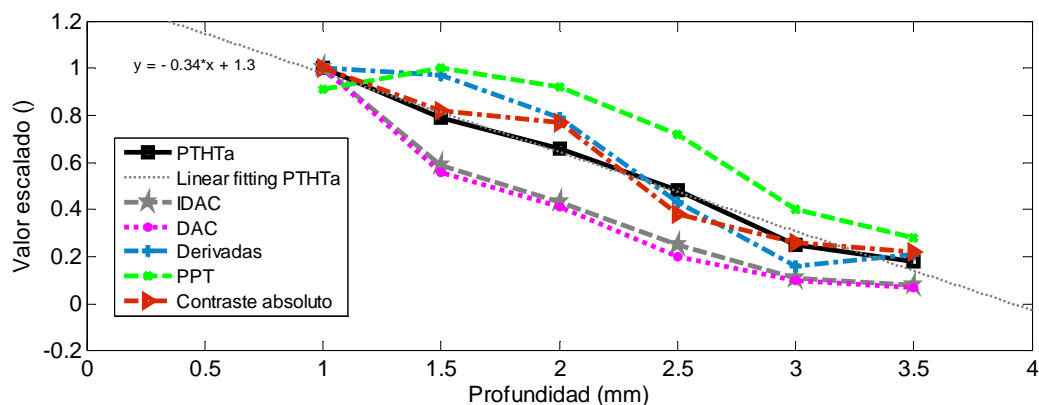


Figura 4-15. Correlación entre el valor escalado (sin dimensiones) y la profundidad de cada defecto en la Figura 4-14 para cada algoritmo presentado. Además se incluye un ajuste lineal de la relación para el algoritmo PHTa cuya ecuación es mostrada en la figura.

razón de la semejanza de los resultados entre los métodos automatizados y los métodos “manuales” (de imprescindible intervención humana).

La información concerniente a la profundidad se mantiene. Representando la escala dada por el algoritmo PHTa versus la profundidad de los defectos, la Figura 4-15 muestra la gran linealidad del PHTa en comparación con el resto de algoritmos. Sin embargo, se resalta que la cuantificación de la profundidad no puede ser realizada de forma absoluta sino únicamente de forma relativa. Es necesario conocer la profundidad de un defecto para, a través de la correlación de la Figura 4-15, obtener la profundidad del resto de los defectos evaluando la ecuación provista.

A pesar del inconveniente en términos de cuantificación de la profundidad, el algoritmo PHTa hace posible la eliminación de los errores debidos a la intervención del operador, siendo la detección de los defectos llevada a cabo de forma absolutamente automática. Además, al igual que con el algoritmo IDAC, la selección de áreas libres de defectos, las no uniformidades de la superficie o de la excitación y la influencia del tiempo inicial de adquisición son eliminadas, algo que no siempre es posible en el resto de propuestas de análisis de secuencias de datos termográficos.

4.3.2 Transformada Radon³⁷

En 1917 el matemático Johann Radon (1887-1956) publicó un artículo donde mostraba que si se conocían todas las integrales de línea de una función en el plano, sin necesidad de conocerla, entonces se podía reconstruir la función, a través de un operador que él construyó, el cual ahora lleva el nombre de transformada de Radon y que representa la integral de $f(x,y)$ a lo largo de un rayo s que atraviesa la figura en dirección θ [Toft, 1996], ver anexo E.

Al igual que la transformada de Hough, la transformada de Radon es capaz de convertir imágenes bidimensionales con líneas rectas de un dominio original a un dominio imagen de los posibles parámetros de las líneas. Cada línea

³⁷ Propuesto por el autor de esta obra y colaboradores y por primera vez presentado en el congreso Thermosense, 2006 celebrado en Orlando [Gonzalez, 2006-Thermosense]

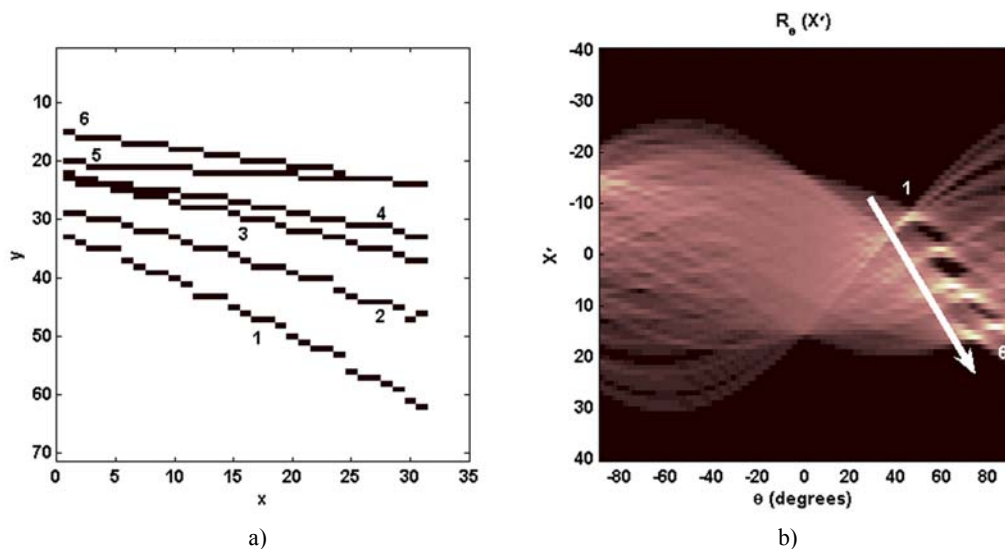


Figura 4-16. Ejemplo del uso de la transformada de Radon para la detección de líneas. En la imagen de la izquierda (a) se tiene la representación de 6 líneas ruidosas cuyas transformadas se superponen en el espacio R de la imagen de la derecha (b). Los picos observados en b) son fácilmente correlacionados con las líneas de a) a través de la observación del ángulo complementario (θ) para cada caso. Igualmente, la coordenada X' en (b) ofrece información acerca del origen ordenado y de cada línea en (a).

del dominio original se representa en el dominio imagen por un pico posicionado en los valores correspondientes del dominio paramétrico.

Modelando una línea con los parámetros (ρ^*, θ^*) , la transformada resulta un pico formado en el espacio R en las coordenadas $\rho^* = \rho$ y $\theta = \theta^*$. La Figura 4-16 representa una ejemplificación del uso de la transformada de Radon para la detección de líneas. En la Figura 4-16b, la evaluación de los picos más fuertes (aquellos puntos en la imagen de mayor contraste y valor) ofrece información acerca del ángulo (en este caso particular es ángulo complementario) y la localización de los segmentos rectos más largos mostrados en la Figura 4-16a.

Aplicando la transformada de Radon a las secuencias termográficas, la evolución temporal de cada píxel se transforma en el espacio transformado. Las diferentes pendientes de la tendencia temporal de los píxeles están asociadas a los picos localizados en la correspondiente matriz Radon transformada.

Al igual que con la transformada de Hough, el objetivo es distinguir si un píxel pertenece a una zona defectuosa o no. Así, asumiendo la inspección de un espécimen semi-infinito y homogéneo, sólo el área relacionada con $\theta = -45^\circ$, que equivale a una pendiente $-1/2$, debe ser evaluada para que la discriminación sea efectiva. Si todos los puntos de la evolución temporal están situados sobre una recta de pendiente $-1/2$, la columna en -45° de la matriz transformada de Radon tendrá una forma muy abrupta, como una delta, en la coordenada de X' que indique el offset de la línea. Pero este caso es ideal ya que las líneas vistas en el espacio bi-logarítmico para la evolución temporal de la temperatura de un píxel superficial pueden considerarse afectadas por un enorme ruido. Analizando la distribución de las ocurrencias de la matriz Radon en la columna de -45° , se observan diferentes perfiles que pueden ser correlados con la pertenencia o no del píxel a un área defectuosa e incluso su profundidad, ver la Figura 4-17.

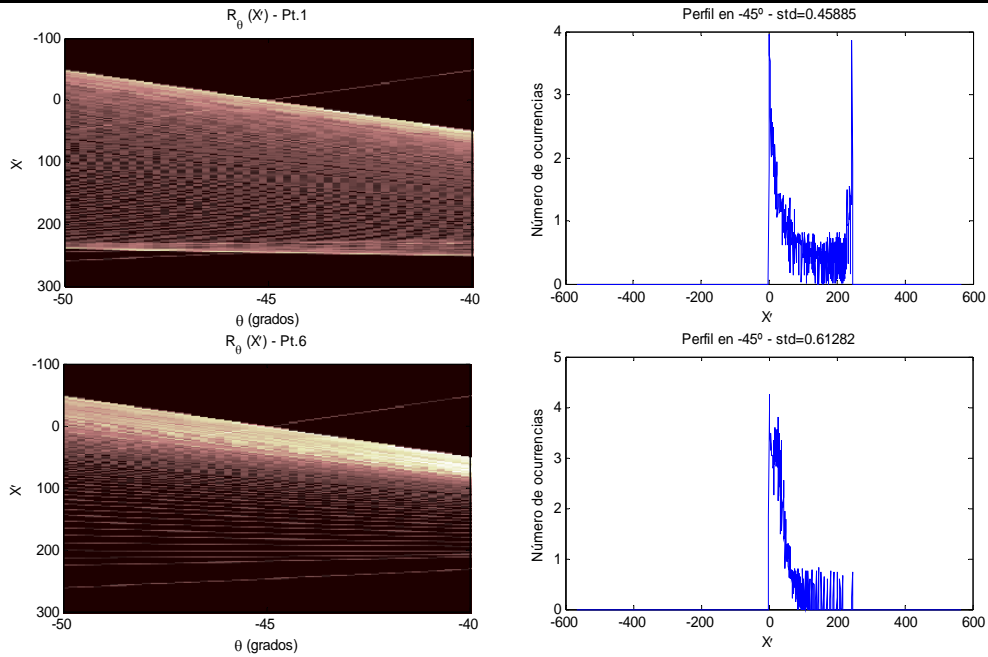


Figura 4-17. Dominio transformado para un píxel en una zona defectuosa (Pt. 1) y en una zona libre de defectos (Pt. 4) de la Figura 4-10. En la columna de la derecha se muestran las distribuciones resultantes de la observación de la columna $\theta=-45^\circ$ donde las diferencias en la anchura de la distribución son claras. El valor de la desviación típica standard de cada distribución es añadido al título de los gráficos de la derecha

Una vez que la transformada es aplicada a cada píxel, de las distribuciones obtenidas se pueden obtener algunas estadísticas básicas, como la media o la desviación típica para el conjunto de ocurrencias en la columna $\theta=-45^\circ$. Para decidir si un píxel pertenece a una zona defectuosa o no, simplemente es necesario observar la imagen única obtenida como fruto de las estadísticas anteriormente comentadas. La Figura 4-18 puede ser comparada con las correspondientes del algoritmo PTHTa. La imagen tiene una correlación de 0.97 con la imagen PTHTa de la Figura 4-14. La linealidad de la correlación entre el valor escalado y la profundidad es evidente al igual que ocurre con el PTHTa [Gonzalez, 2006-Thermosense].

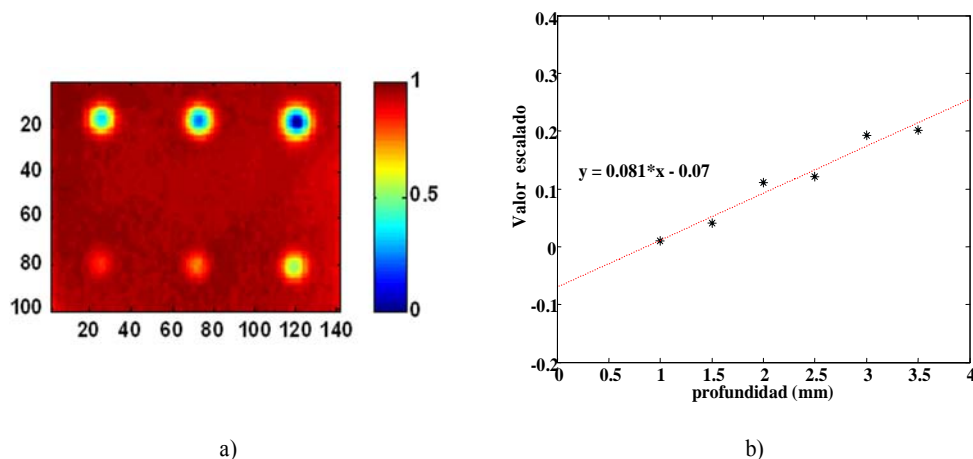


Figura 4-18. a) Imagen única obtenida tras la aplicación del algoritmo de la transformada Radon b) Correlación entre el valor escalado en la imagen a) y la profundidad de los defectos.

De nuevo, con este algoritmo se hace posible la eliminación de los errores debidos a los diferentes puntos de vista del operador, siendo la detección de los defectos llevada a cabo de forma absolutamente automática. La selección de áreas libres de defectos, las no uniformidades de la superficie o de la excitación y la influencia del tiempo inicial de adquisición son eliminadas. El mayor inconveniente de este algoritmo es el coste computacional, que es unas diez veces superior al del PHTA.

4.4 Identificación de patrones lineales

A parte de la representación en espacio bi-logarítmico de los perfiles temporales de la temperatura superficial de un objeto considerado semi-infinito y homogéneo, la aparición de patrones lineales en secuencias termográficas puede ser tratada de la misma forma presentada en el apartado anterior. En esta sección se presentan otras aplicaciones donde el uso de los métodos estadísticos y las transformadas de Hough y Radon ofrecen igualmente una automatización del proceso de análisis.

4.4.1 Fusión de procesados

La Termografía de Fase Pulsada [Maldague, 1996] (PPT- *Pulsed Phase Thermography*) permite pasar del dominio temporal al espectro frecuencial con la ayuda de la Transformada de Fourier discreta (TFD) [Ibarra, 2006]. Cualquier función puede ser descompuesta en sinusoides y, en particular, la evolución temporal de la temperatura superficial de un objeto bajo excitación pulsada da lugar a una respuesta en amplitud y en fase que son de forma par e impar, respectivamente, respecto a la frecuencia $f=0$ Hz, ver anexo D. A partir de estas respuestas a la evolución de cada píxel, se procesan secuencias de amplitud y fase para toda la superficie en forma de imágenes.

La PPT combina dos técnicas termográficas como son la termografía pulsada (por aplicar un impulso térmico) y la termografía lock-in (por el procesamiento de la secuencia y obtención de las imágenes de fase). La fase está menos afectada por los problemas debidos a las no uniformidades de la superficie y de la excitación.

Tras el procesamiento mediante la transformada de Fourier de la secuencia temporal, se obtienen gráficas como la de la Figura 4-19b donde se observa la evolución de la fase para diferentes píxeles (pertenecientes a una zona defectuosa o a una zona libre de defectos). La definición de *frecuencia de corte*³⁸, f_b , parte de la definición de contraste de fase [Sakagami, 2002]: $\Delta\phi=\phi_d-\phi_s$, que implica la frecuencia a la cual no existe un contraste significativo en la fase, $\Delta\phi<umbral$, respecto a la fase de una zona libre de defectos. Los valores umbrales se establecen en base a la experiencia y depende de factores tales como el tipo de material inspeccionado y sus propiedades térmicas y el equipo de medida (relación señal a ruido, etc...). A partir de la ecuación de la profundidad de

³⁸ Término acuñado como interpretación del inglés, *blind frequency*. Esta frecuencia, entendida como la frecuencia a la que el defecto se “oculta” como si se tratara de una zona no defectuosa, viene determinada por la frecuencia a la que las curvas de fase se cortan o entran en contacto. De ahí que se prefiera denominar frecuencia de corte a frecuencia ciega o de ocultación.

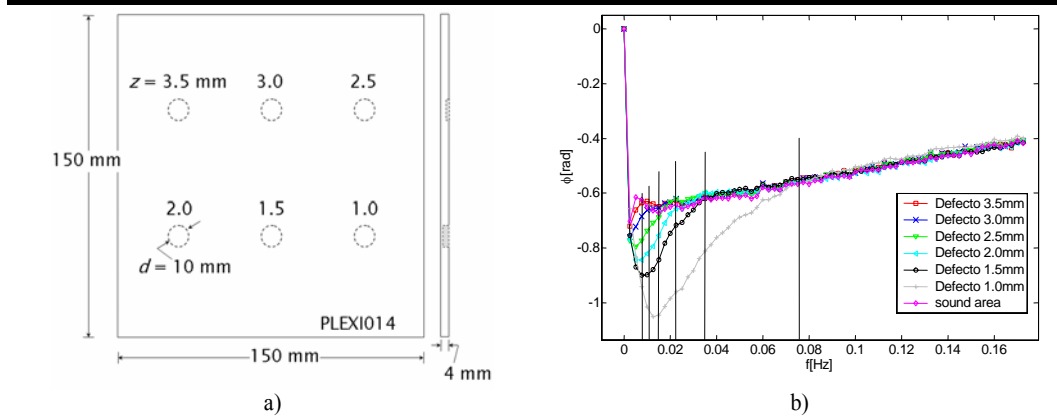


Figura 4-19. a) Muestra de Plexiglas utilizada en el desarrollo de algoritmos de detección de frecuencia ciega b) Imagen de la evolución de las fases para diferentes pixeles situados sobre defectos o sobre áreas libres de defectos, soundarea. Las barras verticales indican la frecuencia a la que el perfil dado para un defecto se confunde definitivamente con el perfil de una zona sin defectos, concepto de frecuencia ciega.

difusion [Maldague, 2001]: $\mu=(2\alpha/\omega)^{1/2}$, y de la definición de retraso de fase [Favro, 1998]: $\phi=z/\mu$, la profundidad z , es relacionada a f_b de la forma:

$$z \propto \phi_s \sqrt{\frac{\alpha_s}{\pi \cdot f_b}} \quad \text{ec. 4.9}$$

donde ϕ_s y α_s son la fase y la difusividad térmica, respectivamente, del material inspeccionado, esto es, de una zona libre de defectos (soundarea).

La estimación de la f_b requiere un eventanado temporal $w(T)$ apto sobre el que realizar la transformada de Fourier para obtener suficiente resolución en frecuencia y que la frecuencia de muestreo, f_s , sea lo sobradamente grande ($f_s \geq 2f_{max}$) como para poder detectar todos los defectos [Ibarra, 2004]. Se trata de un punto de inflexión en los perfiles de la fase. Las componentes frecuenciales más altas en todos los perfiles de fase tienden a una línea recta siguiendo el comportamiento de una zona libre de defectos como se ilustra en la Figura 4-19b. Para las componentes más bajas y en zonas defectuosas, se observan diferentes perfiles en función de la profundidad a la que se encuentra el defecto. Basándose en este hecho y en lo mostrado en las secciones anteriores se presenta una automatización de la PPT para la obtención de la frecuencia de corte de cada píxel. En los desarrollos que siguen a continuación, se asume que los datos de fase han sido correctamente muestreados (esto es, que la resolución temporal Δt es suficientemente alta) y truncados (esto es, la ventana de truncamiento $w(T)$ es suficientemente larga) para las condiciones particulares de las propiedades térmicas del material sustrato y de los defectos, al igual que para la profundidad de los defectos. Mayor información acerca del método PPT puede obtenerse de la referencia [Ibarra, 2006].

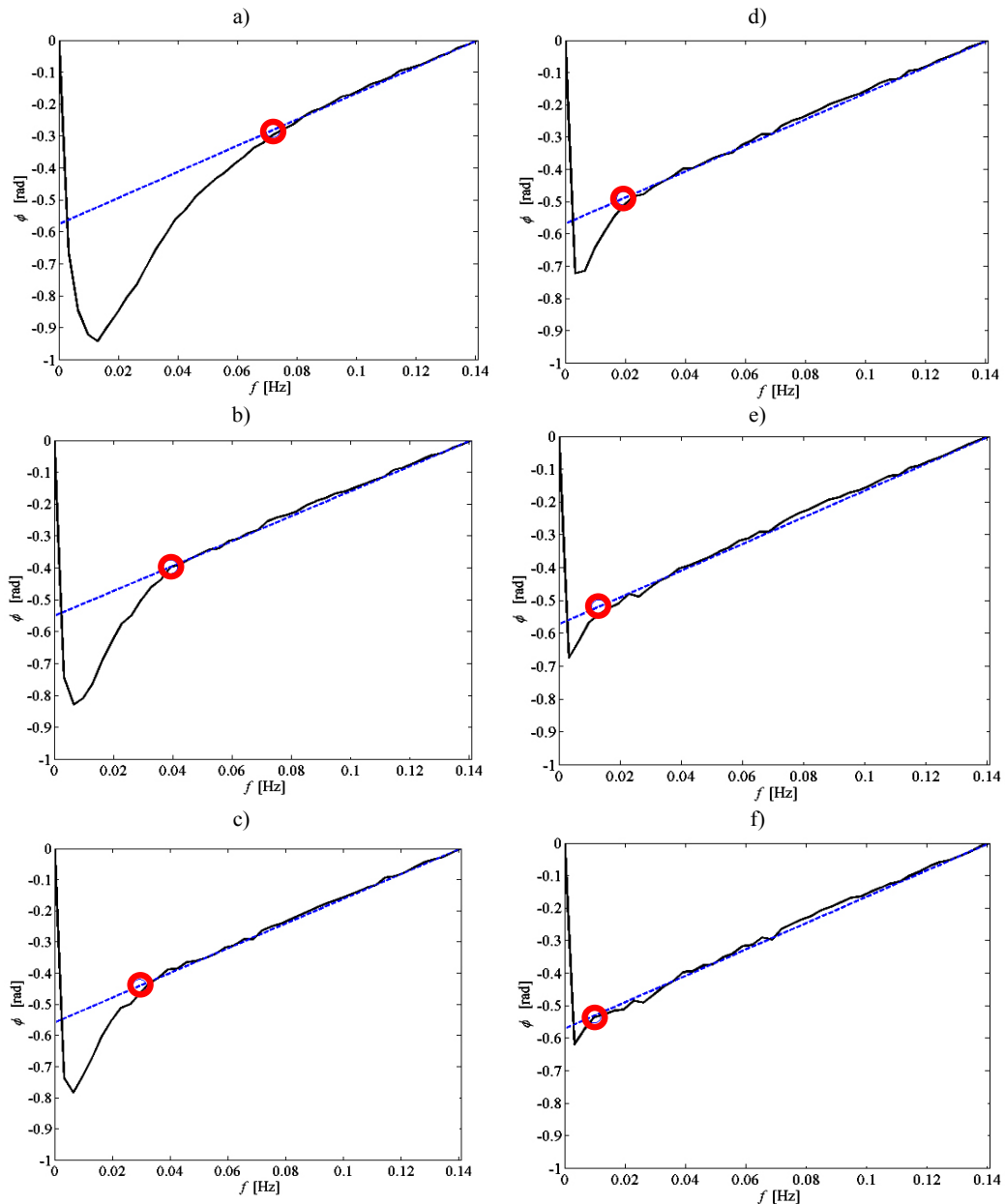


Figura 4-20. Perfiles de evolución de la fase (en color negro) para los 6 defectos del espécimen PLEXI014 de la Figura 4-19a. La línea punteada azul representa el ajuste realizado al aplicar el algoritmo de automatización de la frecuencia de corte. La frecuencia estimada está señalada mediante un círculo rojo en cada caso.

4.4.1.a Automatización de la obtención de la frecuencia de corte³⁹

Usando las técnicas de regresión lineal (sección Métodos estadísticos de este capítulo), una automatización de la identificación de la frecuencia de corte, f_b , es posible [Ibarra, 2004]. El algoritmo estima la pendiente de la curva en el tramo final de cada perfil evolución de la fase. Como se ha discutido previamente, este tramo final de los perfiles es común a todas las fases, independientemente a la correspondencia de un píxel a una zona defectuosa o a una zona libre de

³⁹ Desarrollado con la participación del autor de esta obra y presentado por primera vez en el congreso WCNDT, 2004 celebrado en Montreal [Ibarra, 2004]

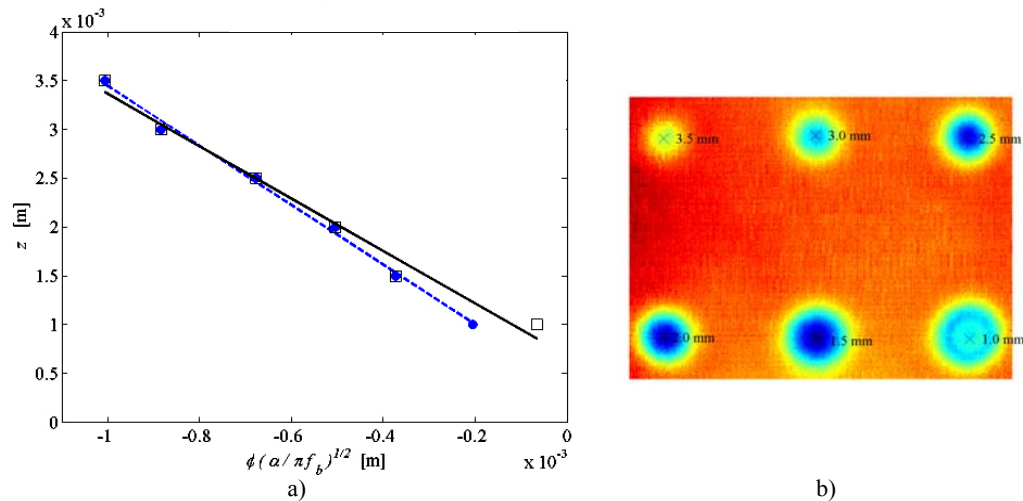


Figura 4-21. a) Correlación de profundidad y frecuencia de corte, z vs. f_b usando el contraste de fase (\square) y la automatización propuesta (\bullet) para los 6 defectos del espécimen PLEXI014 de la Figura 4-19a. La línea punteada azul representa el ajuste lineal realizado a la correlación dada por el método automatizado ($R=0.9981$) mientras que la línea continua negra corresponde a las estimaciones dadas por el método de contraste de fase ($R=0.99176$). b) Imagen obtenida de la aplicación del método automatizado de detección de la frecuencia de corte.

defectos, ver la Figura 4-19. Empezando por la frecuencia más alta disponible, se ajusta la tendencia por métodos estadísticos (regresión lineal) hasta una frecuencia dada f_n . Esta frecuencia f_n , es progresivamente reducida (así más puntos son considerados en la regresión cada vez) y la pendiente es recalculada y comparada con el valor previo dado por la regresión. El procedimiento se repite hasta una frecuencia en la que se considera que la pendiente diverge considerablemente. Los parámetros umbrales de la toma de decisiones son establecidos en base a diferentes experimentaciones.

Una representación gráfica de los resultados obtenidos con la aplicación de este algoritmo puede observarse en la Figura 4-20. La frecuencia estimada está señalada mediante un círculo rojo en cada caso, comprobándose claramente la fiabilidad y validez de la automatización.

Los resultados vistos en la Figura 4-21 resultan de la comparación entre las profundidades de los defectos estimadas mediante este algoritmo de automatización y la identificación visual de la f_b a partir de las curvas de contraste de fase por parte de un usuario especializado. De igual forma, con la obtención de las frecuencias se puede generar una imagen como la de la Figura 4-21 b donde claramente los defectos se localizan.

4.4.1.b Algoritmo DAPhC⁴⁰

Se ha visto cómo la detección automática de f_b representa una mejora en la funcionalidad del algoritmo PPT. Éste ofrece buenos resultados en la estimación de la profundidad de los defectos si se es capaz de detectar un contraste de fase suficientemente preciso. Sin embargo, la subjetividad humana está presente ya que es necesario interpretar en las curvas dónde se produce la divergencia de la

⁴⁰ Differentiated Absolute Phase Contrast, DAPhC: Propuesto por el autor de esta obra y colaboradores y por primera vez presentado en la publicación en la revista Infrared Physics Technology [Gonzalez, 2006-InfPhy]

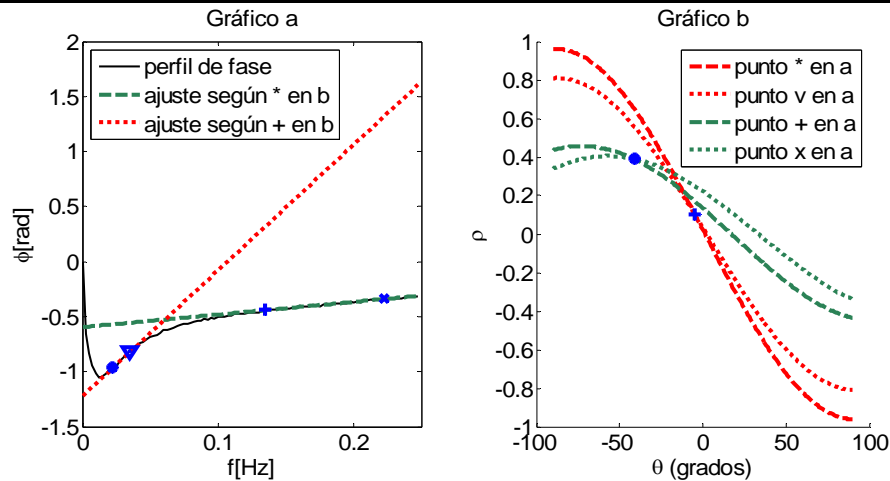


Figura 4-22. Transformada de Hough aplicada a cuatro puntos sobre la evolución de la fase de un píxel defectuoso.

evolución de la fase de un píxel defectuoso de la evolución de un píxel en una zona sin defectos.

La implementación de la transformada Hough a la estimación de la frecuencia de corte f_b da lugar a un nuevo algoritmo de automatización (Differentiated Absolute Phase Contrast, DAPhC) [Gonzalez, 2006-InfPhy].

Basado en la Transformada de Hough, identifica las rectas existentes en el perfil de la evolución de fase de un píxel dada por el método PPT como se aprecia en la Figura 4-22.

Como se presenta en el apartado 4.3.1, la estimación de rectas que ajusten datos ruidosos puede ser efectiva aún existiendo valores atípicos. Las curvas de evolución de fase son un claro ejemplo. Sin embargo, a diferencia del algoritmo presentado en el anterior apartado, la transformada de Hough logra el ajuste lineal sin necesidad de un elevado número de muestras en un segmento recto. Mientras que para la Automatización de la obtención de la *frecuencia de corte* la regresión comienza por las frecuencias más elevadas y es necesario un rango de frecuencias suficiente con tendencia lineal para resultar efectivo, la transformada de Hough puede empezar el ajuste por las frecuencias más bajas, como se observa en la Figura 4-23, y así evita la necesidad de muestreados muy altos y la pérdida de resolución frecuencial que éste conlleva.

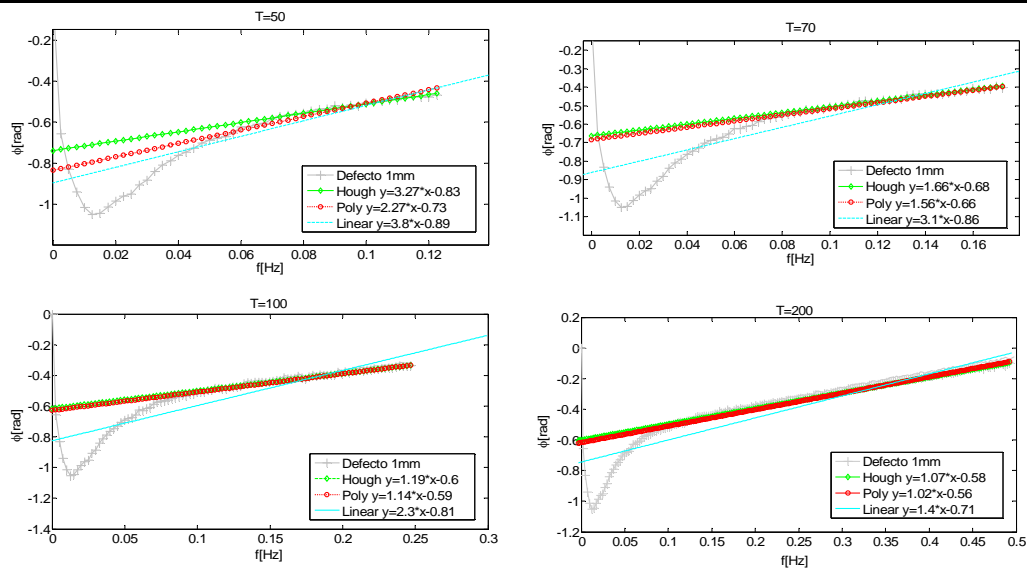


Figura 4-23. Ajustes lineales realizados haciendo uso de la transformada de Hough (línea de color verde) y regresiones lineales: i) sin intervención humana (ajuste por regresión lineal estadístico puro, línea azul) y ii) con una mínima intervención humana (ajuste por regresión donde los puntos extremos de la regresión son seleccionados, ver [Ibarra, 2004b], en color rojo). Cada gráfica está compuesta por un número de puntos dado por T .

La dependencia del ajuste en función del tamaño de los datos T puede verse en la Figura 4-23. La comparación de ajustes se realiza para la transformada Hough (línea de color verde) y regresiones lineales: i) sin intervención humana (ajuste por regresión lineal estadístico puro, línea azul en las gráficas) y ii) con una mínima intervención humana (ajuste por regresión donde los puntos extremos de la regresión son seleccionados, ver [Ibarra, 2004b], en color rojo). Claramente se ve cómo la automatización realizada por el algoritmo DAPhC logra resultados comparables a los obtenidos con intervención humana.

La influencia del valor del número de puntos sobre el que se realiza el ajuste sólo es determinante en el caso de la regresión pura. Todas las técnicas de ajuste lineal se ven afectadas por el número de puntos que se incluyen en la regresión. Sin embargo, la transformada de Hough presenta menos variaciones en la estimación de f_b para diferentes T . No puede considerarse una interpolación basada en pesos debido a que el valor de la f_b es desconocido y además puede variar mucho. Tampoco conviene escoger un número de muestras suficiente y seguro por incrementarse el tiempo de procesado del algoritmo. Siendo un algoritmo para la detección de líneas rectas basado en la acumulación de ocurrencias, la transformada de Hough ofrece buenos resultados a partir de las 70 muestras gracias al hecho de que los datos atípicos y dispersivos no le son tan representativos.

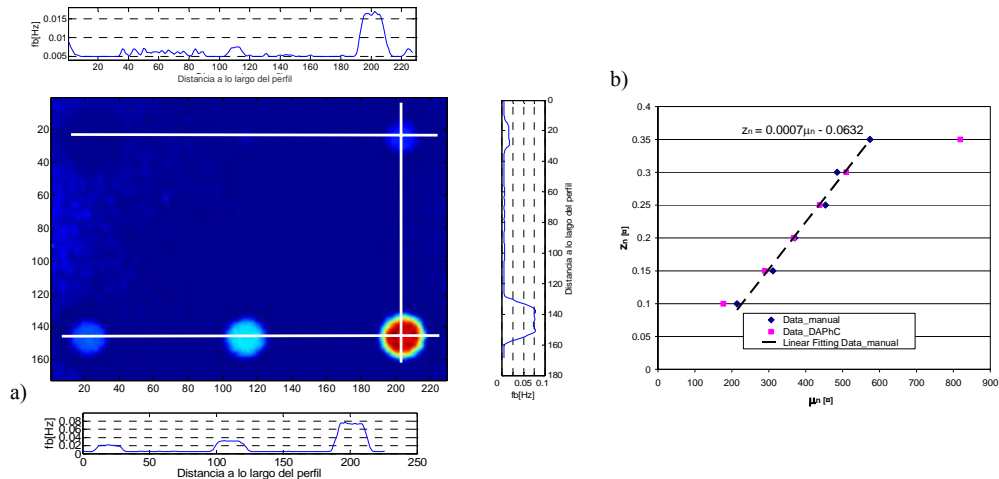


Figura 4-24. a) Imagen única resultado del DAPhC b) Correlación entre la profundidad y la f_b para el espécimen de Plexiglas analizado, el mismo presentado en la Figura 4-19.

El algoritmo, identifica la f_b de la evolución en fase de cada píxel y su valor es recogido en una única imagen donde todos los defectos detectables son visibles. La profundidad, z , de cualquier defecto puede relacionarse a su f_b calibrando el proceso de inversión. Esta relación se representa en la ec. 4.9 que se resuelve mediante una regresión lineal de los datos experimentales. Los resultados del algoritmo DAPhC mostrados en la Figura 4-24 concuerdan con aquellos obtenidos bajo criterios humanos [Gonzalez, 2006-InfPhy].

4.4.2 Excitaciones eléctricas

En algunas aplicaciones, las excitaciones térmicas provocadas se ajustan a una tendencia lineal. De igual forma, es de esperar que en elementos de baja capacidad térmica (básicamente resistivos) la respuesta a tales excitaciones también sea lineal. En esos casos, la aplicación de los algoritmos aquí descritos ofrece posibilidades de identificación de anomalías o comportamientos extraños que se salen del patrón lineal previsto. Una vez más, ante señales ruidosas y con numerosos valores atípicos (como son las imágenes termográficas), los métodos estadísticos robustos y las transformadas de Hough y de Radon resultan efectivos.

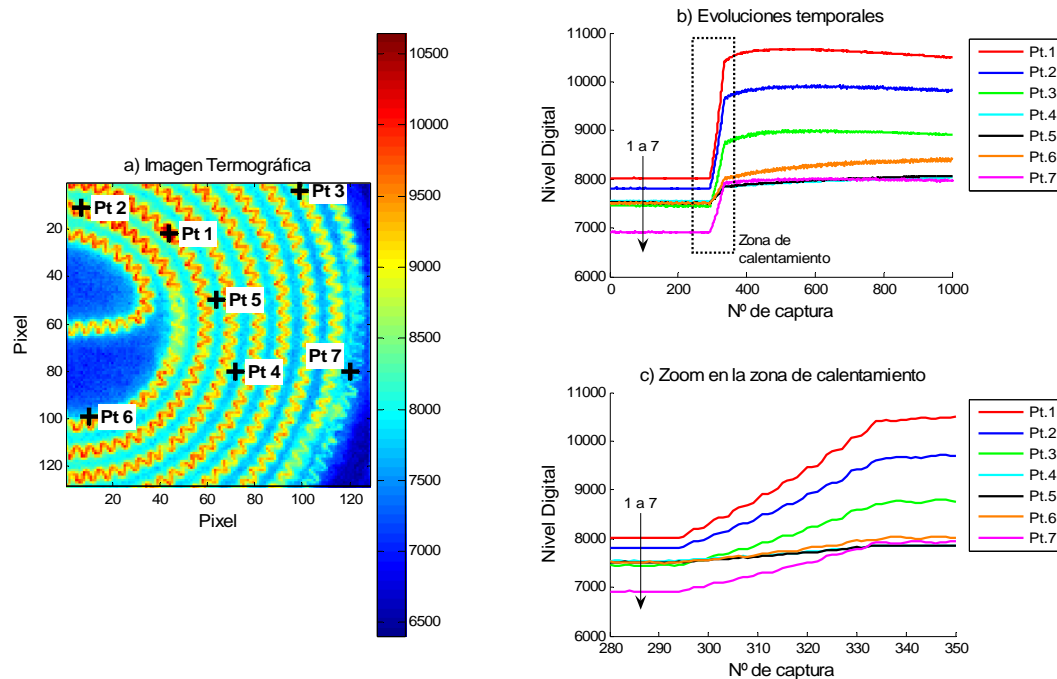


Figura 4-25. Localización de los píxeles bajo inspección. Pt 1 y Pt 7 están localizados sobre defectos en el fleje. Pt 2 y Pt 3 pertenecen a zonas libres de defectos en el fleje mientras Pt 4, Pt 5 y Pt6 lo son del material sustrato. b) Niveles digitales de la radiación infrarroja incidente ofrecidos por la cámara durante la excitación. c) Zoom de la zona de calentamiento donde la diferencia de las pendientes y los valores iniciales de cada perfil son apreciados.

Se invita al lector a la consulta del anexo C donde se presenta la validación industrial de los trabajos realizados por el autor en la evaluación de focos vitrocerámicos. Como fuentes de calor, responden térmicamente por efecto Joule siguiendo la forma de la excitación eléctrica. La Figura 4-25 recoge la evolución temporal de la temperatura en distintos puntos del foco vitrocerámico para una excitación en forma de pulso cuasi instantáneo (0.1s). Se percibe, para cada píxel, una tendencia prácticamente lineal durante la corta excitación. Este comportamiento viene caracterizado por una pendiente y un valor inicial, diferentes para cada píxel, según se trate de un píxel del material sustrato, del fleje o elemento resistor, o de un defecto o anomalía.

Algunos tipos de defectos exhiben un comportamiento térmico similar que se traduce en una variación de la pendiente de calentamiento local en el fleje que es fácilmente captada por una cámara infrarroja como se aprecia en la Figura 4-25. La razón de tales comportamientos es simple, una vez que se analizan las condiciones de transferencia de calor para cada caso en particular. Así, la existencia de grapas es detectada por la ausencia de uniformidad a lo largo del recorrido del elemento calentador presentando zonas localizadas con menor pendiente que sus alrededores. Ésto se explica porque las grapas presentan un aporte extra de superficie en contacto con el aire y, por tanto, el calor se disipa más rápidamente. Áreas de pendientes localmente más bajas también son motivadas por estiramientos de las espiras del fleje. Por el contrario, áreas o puntos donde la pendiente de la evolución temporal de un píxel durante el calentamiento es más alta de lo normal, se corresponden con puntos en los que las espiras se solapan o donde se produce una unión de tramos de fleje (son soldados con un aporte de material extra que aumenta la resistencia y,

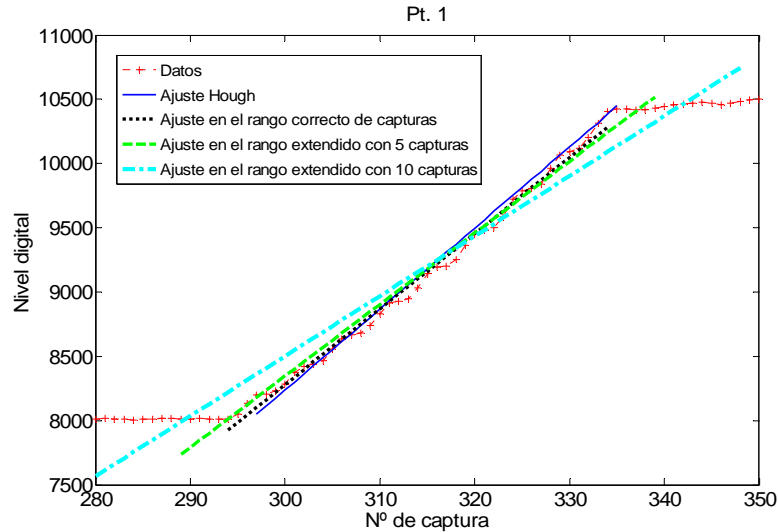


Figura 4-26. Evolución de Pt. 1 durante el calentamiento. Se reproducen varios ajustes lineales. La necesidad de conocer el instante o número de captura exacto donde el calentamiento empieza es evidente. Los ajustes lineales involucran el rango exacto del calentamiento y un rango extendido de 5 y 10 capturas más a cada lado. Sin embargo, la transformada de Hough evita esta necesidad, como puede observarse.

consecuentemente, la temperatura, al paso de la corriente eléctrica). Finalmente, los efectos de un deficiente contacto entre el fleje y el sustrato, bien por falta de contacto bien por soterramiento del fleje en el sustrato, provocan un emborronamiento de la imagen infrarroja en ese área (el efecto de la convección del aire se acentúa o se minimiza) mostrando valores de pendiente menores o mayores de lo habitual respectivamente.

Ante la falta de sincronismo preciso entre el sistema de excitación eléctrica y la cámara infrarroja, la transformada de Hough ayuda a la detección y evaluación de la tendencia lineal. Siendo procesos extremadamente rápidos (el calentamiento es de 0.1s), existe una dificultad inherente en el establecimiento de unos tiempos exactos en los que el flanco de subida de interés está perfectamente limitado. La cámara infrarroja debe ser rápida para capturar tanta información como sea posible del calentamiento. Pero numerosas capturas en poco espacio de tiempo impiden una correcta sincronización del momento en el que realmente la excitación se produce. La Figura 4-26 muestra el empleo de la transformada Hough, insensible a los datos dispersos, y que posibilita la automatización de la detección del comportamiento lineal sin necesidad de un ajuste fino del tiempo o un número de captura exacto en el que empieza el calentamiento.

Finalmente, el valor de la pendiente detectada clasifica los píxeles dando lugar a áreas de comportamiento anormal con respecto a sus vecinos. Cada píxel es representado por su pendiente, formando una imagen única donde todos los defectos son apreciables. Su discusión requiere la observación de los valores de la pendiente y una cierta experiencia personal en este tipo de situaciones, ver Figura 4-27.

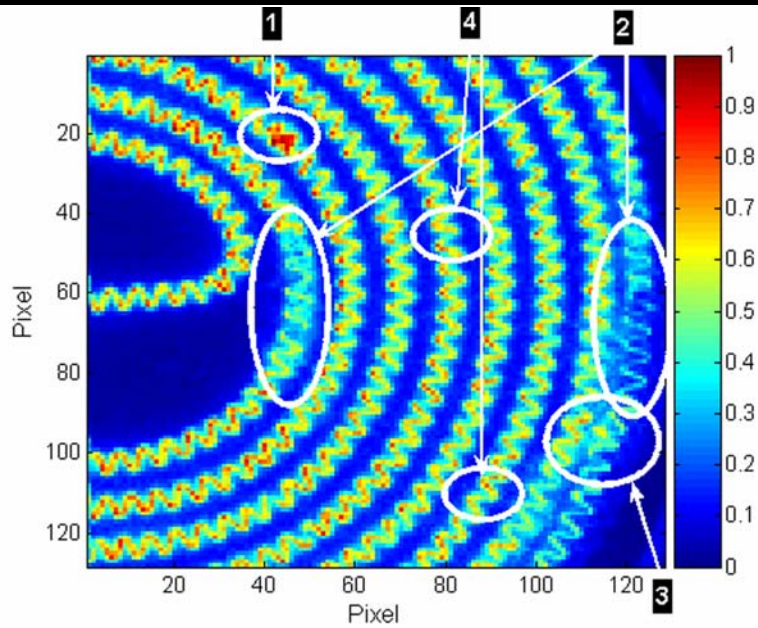


Figura 4-27. Imagen de la pendiente normalizada durante el calentamiento para cada píxel obtenida por medio de la aplicación de la transformada de Hough. Varias áreas están circunscritas exhibiendo grandes diferencias en cuanto a la pendiente con sus alrededores: 1) defectos originados por un exceso de material (uniones, dobles espiras,...); 2) déficit de sustrato bajo el fleje; 3) exceso de sustrato acumulado entre espiras del fleje; 4) grapas.

4.5 Discusión de los resultados

Centrándose en la aplicación de la detección de defectos subsuperficiales, distintas técnicas han sido desarrolladas por la comunidad científica para la extracción de datos de las secuencias termográficas. Su utilización requiere dominio de mecánica del calor en sólidos y procesamiento de imagen, además de cierta experiencia en inspecciones térmicas. De la información suministrada en el anexo D, se percibe la necesidad de crear herramientas software capaces de ayudar en la toma de decisiones relacionadas con la detección de defectos subsuperficiales en materiales, al igual que en su evaluación cuantitativa.

En este capítulo se han desarrollado herramientas que automatizan el proceso de detección y de evaluación de anomalías, dando como resultado imágenes únicas donde los defectos detectables están presentes y de donde se extrae información relativa a la profundidad de los mismos. A partir del *contraste diferencial*, se es capaz de discernir el comportamiento de un píxel situado en una zona defectuosa del comportamiento de una zona libre de defectos, siempre y cuando se logre modelar la transferencia de calor en el material. Evaluando materiales homogéneos y que puedan considerarse semi-infinitos (de espesor considerable en relación a propiedades térmicas de los materiales como la profundidad de difusión), la temperatura superficial de un cuerpo de estas características, tras una excitación térmica en forma de pulso de su superficie, sigue un comportamiento lineal, con respecto al tiempo, en una representación bi-logarítmica. Este tipo de modelados no puede realizarse con los conceptos clásicos de contraste (absoluto, normalizado,...) que suelen utilizarse. Además, el conocer cómo debiera ser la evolución térmica de la superficie en el caso de no

tener defectos internos permite un instrumento de comparación que discrimine los casos en los que existan deficiencias.

La identificación de un comportamiento lineal en un conjunto de datos es resuelto en otras áreas de conocimiento como la estadística (regresión lineal) o la identificación de patrones en el tratamiento de imagen. Tratándose de evoluciones temporales de relativa no linealidad, heterocedasticidad, con existencia de valores atípicos y de gran ruido, las soluciones propuestas son reducidas a métodos estadísticos robustos y al uso de la transformada de Hough y la transformada de Radon. Las secuencias termográficas son analizadas mediante algoritmos basados en estas técnicas eliminando los problemas comunes que eran solventados hasta el momento por el técnico-analista que opera con el sistema termográfico.

Se elimina así la necesidad de elección de una zona que, a priori (anterior a la inspección), se sabe que carece de anomalías o defectos, algo imprescindible en el software existente hasta la fecha y presentado en el capítulo 2 de Estado del Arte. Se evitan los efectos de la falta de sincronismo o de correcta temporización de las capturas y que resulta en una inexactitud de la estimación de parámetros tales como la profundidad de los defectos. Se proveen imágenes únicas de una forma automatizada donde se perciben todos los defectos detectables en una única imagen, entendiendo como todos los defectos detectables aquellos percibidos con el uso de otras técnicas introducidas en el anexo D. Por último, se han realizado estimaciones de las profundidades a las que se encuentran los defectos, estableciendo diferentes comparativas con los resultados obtenidos con otros métodos.

La aplicación de los diferentes algoritmos propuestos es satisfactoria comparando con el uso de técnicas más potentes. La aplicación de las transformadas de Hough o de Radon conlleva desventajas como el tiempo de computación y la estimación relativa de las profundidades. El conocimiento de un valor en profundidad es necesario (por ejemplo, la profundidad de uno de los defectos) para, a continuación y por medio de las correlaciones obtenidas de las experiencias, estimar la profundidad del resto de defectos. Sin embargo, el beneficio de su uso es considerable, a tenor de los resultados aquí presentados (imágenes de gran contraste, toda la información relevante en una única imagen, gran linealidad de las correlaciones entre profundidad y los valores escalados correspondiente). Recordar una vez más, que los procesos son automatizados, que sólo la inclusión del nombre de una matriz de secuencias termográficas como variable a las respectivas funciones es necesaria, eliminando toda interacción humana desde la captura de la secuencia hasta la evaluación de los resultados y reduciendo así la subjetividad de los mismos.

4.6 Conclusiones y resultados relevantes

En este capítulo se han presentado técnicas de computación que permiten una automatización de los procesos inherentes a una evaluación de una secuencia resultado de una inspección termográfica. La captura de una secuencia termográfica resulta sencilla pero no la extracción de información, como ocurre

en la medida cuantitativa de propiedades y profundidades de defectos en objetos.

Se ha desarrollado el uso de métodos estadísticos y de transformadas para la identificación de patrones lineales que se encuentran en las evaluaciones de secuencias termográficas. Por una parte, la detección y estimación de defectos internos en materiales homogéneos ha sido llevada a cabo haciendo uso de algoritmos modificados de interpolación (algoritmo IDAC), métodos estadísticos robustos, algoritmos basados en la transformada de Hough y en la transformada de Radon. En todos ellos, los algoritmos asocian a cada defecto un valor que, escalado, permite la obtención de imágenes únicas donde se perciben los defectos detectables. De igual forma, se evalúa la correlación entre la profundidad de los defectos y el valor escalado asociado.

Una modificación, algoritmo DAPhC, es presentada como fusión de diferentes procesados donde estas técnicas de identificación de patrones lineales permiten la determinación de valores de frecuencia que posteriormente, el método PPT, es capaz de relacionar con la profundidad. En este caso, la ventaja es que puede conocerse la profundidad en forma absoluta, esto es, sin necesidad de tener una referencia como ocurre en el caso de los algoritmos anteriores.

Las propuestas de los diferentes algoritmos que se han efectuado han sido contrastadas exitosamente con los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio. Por último, se añade una incorporación de estas técnicas a aplicaciones donde, como es el caso, existe el factor común de un comportamiento, tendencia o patrón lineal. Evaluando defectos en focos vitrocerámicos se observa que, ante una excitación eléctrica casi instantánea, el calentamiento de los diferentes elementos es ajustado por una línea recta cuya pendiente ofrece información acerca del estado del elemento. Así, diferentes tipos de defectos pueden ser observados y clasificados en las imágenes que, de nuevo sin intervención ni subjetividad humana asociada, son provistas de forma automática a partir de la secuencia capturada por el sistema termográfico.

Finalmente debe mencionarse que las contribuciones relacionadas con este capítulo han sido recogidas en varias publicaciones, tanto en congresos como en artículos de revistas internacionales incluidas en el SCI con proceso de revisión por pares. Otras están a expensas de ser publicadas. A lo largo del capítulo han aparecido referencias a los distintos trabajos elaborados, o en los que el autor ha participado, señaladas mediante el uso de diferentes notas al pie de página. Principalmente, estas notas hacen referencia a los primeros resultados presentados siendo el lugar de publicación, por lo general, congresos de corte internacional y de gran relevancia y repercusión en el estado del arte de la termografía infrarroja.

PARTE 3

CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

En esta parte se incluyen las conclusiones más significativas que se extraen de los resultados presentados y se establecen líneas directrices de futuros trabajos en termografía infrarroja sobre carencias o problemáticas detectadas a lo largo de la realización de la tesis. Ellas darán continuidad a las investigaciones aquí recogidas.

Capítulos:

5. Conclusiones y líneas futuras

5 Conclusiones y líneas futuras

Resumen y conclusiones

Los ensayos no destructivos sirven para examinar o inspeccionar un componente, material o sistema sin afectar a su utilidad en el futuro. Con ellos se busca asegurar la integridad y fiabilidad de un producto, evitar fallos y prevenir accidentes, producir beneficios y procurar satisfacción en el usuario por el producto, ayudar a la mejora en el diseño de los componentes, productos y sistemas, aportar una uniformidad de la calidad o controlar los procesos de fabricación y reducir sus costes. Estas razones ofrecen un beneficio al uso de los ensayos no destructivos contribuyendo a su expansión y aceptación junto con los desarrollos de la tecnología y la mayor demanda de seguridad y calidad.

A lo largo de este trabajo se han realizado aportaciones al avance de la termografía infrarroja como técnica de evaluación y prueba de materiales y procesos. La inspección térmica proporciona información relevante acerca de la calidad de los productos y de los procesos en los que la temperatura o la transferencia de calor son protagonistas. Al realizar estas medidas de forma remota (sin contacto) se evita la intrusión y posible alteración o destrucción de la muestra. La obtención de imágenes térmicas permite la observación bidimensional de los mecanismos de transferencia de calor otorgando mayor cantidad de información, en comparación con las técnicas de medida meramente puntuales. La posibilidad de analizar y registrar temporalmente estas imágenes, conduce a un mayor control y conocimiento de los procesos bajo inspección. Todo ello hace que la termografía infrarroja (TI) se posicione como una alternativa seria, fiable y precisa en un campo como el de los ensayos y pruebas no destructivas.

Las aplicaciones en las que la TI exhibe sus atractivas características de ser una técnica rápida, no invasiva, sin contacto, segura, fiable, precisa y de fácil interpretación de sus resultados son numerosas, como se desprende de la lectura de la obra y de sus referencias. En este documento se hace especial hincapié en la detección de defectos internos en materiales a través de la TI. Adicionalmente, y para no sobrecargar al lector, se incluye como apéndice (anexo C) un conjunto de trabajos realizados en aplicaciones industriales utilizando TI que, por un lado, han servido para validar en campo parte de lo aquí aportado y, por otro, han servido para la apertura de nuevos nichos de aplicación.

Del estado del arte se desprendieron problemáticas y/o carencias no satisfechas y sobre ellas se posicionaron los trabajos más significativos de la tesis. Por ello, en el capítulo 3 se recogen las aportaciones efectuadas sobre la detectabilidad de sistemas de termografía infrarroja, lo que se contrastó utilizando dos sistemas diferentes, uno basado en pulsos térmicos de larga duración y otro en pulsos de duración muy corta (flashes).

La detectabilidad se establece como un umbral cuantificable que depende de la sensibilidad térmica del sistema y de la resolución espacial del mismo. Se

introducen los factores que provocan tanto un decremento o incremento de la detectabilidad de anomalías. Estos factores son característicos a la superficie del objeto bajo medida, del medio de transmisión entre el objeto y el equipo inspector o del instrumento de medida. Las variaciones de emisividad, el efecto de las reflexiones, la degradación del equipamiento, tanto en su óptica como en su electrónica, las características térmicas del material (conductividades y difusividades) y las características físicas y mecánicas de las anomalías (tamaño, profundidad, localización cerca de bordes u otras discontinuidades) caracterizan la detectabilidad. La inspección de anomalías de tamaño considerable, poco profundas, alejadas de los bordes o contornos y las características térmicas del espécimen apropiadas (baja difusividad lateral) actúan a favor de una buena detectabilidad de las discontinuidades internas en los materiales.

Se observa igualmente que existe la posibilidad de incrementar el contraste térmico entre material y discontinuidad mediante el aporte de una mayor energía térmica al objeto bajo inspección, esto es, la termografía infrarroja activa. Como se desprende de los estudios presentados, la aplicación de pulsos de mayor o menor duración conlleva diferencias en cuanto a la detectabilidad de los defectos (sobre todo en el valor del máximo contraste y el tiempo de observación del máximo contraste). La definición de área de detectabilidad permite valorar el incremento en efectividad de detección que se obtiene aumentando el tiempo de la excitación ante pobres digitalizaciones. Anomalías a mayor profundidad y de menor tamaño ofrecen así contrastes de temperatura detectables en comparación con la resolución térmica y la sensibilidad térmica del sistema.

De igual forma, la utilización de una excitación de mayor duración permite el uso de cámaras termográficas de menores prestaciones con la consiguiente reducción de costes. Como validación en campo y haciendo uso del concepto de detectabilidad, se ha evaluado en el capítulo 3 un sistema desarrollado por el Materials Research Center de la Universidad de Bath en el Reino Unido, de bajo coste, basado en lámparas de radiación infrarroja y una cámara de infrarrojos miniatura, capaz de ofrecer resultados comparables al sofisticado sistema ThermoScope, sistema comercial de TWI Inc.

Por otro lado, como también se desprende de la lectura del capítulo 2 de Estado del Arte, el desarrollo de software está disfrutando de una eclosión importante con motivo de la incorporación de gran potencial computacional a los sistemas termográficos. Nuevas funciones que ayudan a la interpretación de las secuencias termográficas se están desarrollando con especial orientación a la idea de permitir una medida cuantitativa en la detección de defectos subsuperficiales en los materiales. La profundidad, el tamaño, la forma y sus características térmicas resultan de interés para su caracterización.

Para evitar la subjetividad del ser humano en la toma de decisiones, mejorar su velocidad y, en definitiva, obtener una mejor eficacia y la reducción de costes, se han presentado contribuciones realizadas para posibilitar la automatización de la toma de decisiones en torno a la presencia o no de anomalías. La tecnología ha mejorado sensiblemente los recursos hardware pero

el software aún requiere ser utilizado por personal técnico cualificado con suficientes conocimientos de áreas tan dispares como la mecánica de sólidos, la transferencia de calor, la óptica, la electrónica, la programación y el procesado de señales e imágenes. Toda automatización lleva consigo la reducción de la subjetividad inherente al sistema que aporta el personal mencionado, aumentando la efectividad de esta técnica de ensayos no destructivos. Por ello en el capítulo 4, se han recogido contribuciones para la valoración automática de la evolución de la temperatura superficial de un objeto tras ser excitado con un pulso térmico en forma de flash. Asimismo, mediante el contraste diferencial se obtiene el modelado del perfil temporal que sigue la temperatura de un píxel superficial siempre que esté en un área libre de defectos. Ante la evolución de un píxel inscrito en un área de influencia de una anomalía interna, el modelo difiere claramente, siendo así posible la detección de los defectos internos.

Siendo imprescindible la comparación con un modelo lineal, de pendiente $- \frac{1}{2}$, diferentes propuestas se han presentado en el capítulo 4 para el ajuste de los datos del perfil temporal evolución de la temperatura de un píxel superficial a una línea recta. Se proponen métodos estadísticos al igual que métodos de transformadas de imágenes. Con todos ellos se logra la automatización plena del proceso de detección de anomalías internas al ofrecer una única imagen en la que aparecen todas las imperfecciones que pueden ser detectadas. Los resultados son comparables a los obtenidos con una inspección personalizada.

Finalmente debe mencionarse que las contribuciones relacionadas con este trabajo han sido recogidas en un total de treinta publicaciones, como se puede ver en el apartado 6.3, en el capítulo de bibliografía. A lo largo del documento se han citado referencias a los distintos trabajos elaborados por el autor señaladas mediante el uso de diferentes notas al pie de página.

Líneas abiertas y futuros trabajos

Como se desprende de la lectura de esta obra, las líneas abiertas que deja, pueden ser clasificadas por sus objetivos a alcanzar. En este caso, vienen definidas por:

- Nuevas algorítmicas que permitan la caracterización o cuantificación más rápida y precisa de los defectos internos en los materiales - en este caso se procuraría igualmente la obtención de técnicas automáticas de evaluación de los defectos en los materiales.
- Desarrollo de software más preciso, rápido y amigable incluyendo modelados de especímenes más complejos (con geometría superficial compleja, materiales anisótropos y con diferencias en conductividades según dirección, materiales estructurados con un mayor número de "capas" - hay que recordar que el modelado aquí utilizado (comportamiento lineal de pendiente $- \frac{1}{2}$ de la evolución temporal de la temperatura superficial del objeto) está definido para cuerpos homogéneos y semi-infinitos.
- Modelado y automatización de secuencias termográficas resultado de la aplicación de otras formas de generar calor (láser, ultrasonidos, termografía de pulso largo, termografía lock-in,...) - los perfiles de

evolución temporal de la temperatura superficial cambian según la excitación utilizada.

Por otra parte, futuros trabajos de investigación, fuera de la línea marcada por esta obra, pueden desarrollarse siguiendo las directrices que a continuación se presentan:

- Desarrollo de fuentes ópticas en otras longitudes de onda (3-5 μm) que permitan otras técnicas de excitación.
- Desarrollo de detectores en otras longitudes de onda (por ejemplo, ~1.8-2.2 μm) evitando la banda de atenuación atmosférica que permitan la captura de imágenes en rangos diferentes y más propios de las comunicaciones ópticas.

Estas últimas proposiciones permitirían un mayor espectro de posibilidades y la adecuación de sistemas termográficos a las técnicas de comunicaciones ópticas. El uso de la fibra óptica y de los componentes ópticos desarrollados en estas longitudes de onda permitiría la creación de “endoscopios termográficos” de gran utilidad en campos como la biomedicina, la detección de compuestos, los ensayos no destructivos, el mantenimiento preventivo, etc según la humilde opinión de este autor.

PARTE 4
REFERENCIAS y ANEXOS

Capítulos:

6. Bibliografía

Anexos:

- A. Principios fundamentales de la Física del calor*
- B. Conocimientos y técnicas claves en termografía infrarroja*
- C. Aplicaciones industriales de la termografía infrarroja*
- D. Técnicas de procesamiento de imágenes en secuencias termográficas*
- E. Algoritmos de detección de patrones lineales*
- F. Equipamiento utilizado*

6 Bibliografía

6.1 Referencias por capítulos

Para facilitar el seguimiento de la lectura, las referencias bibliográficas se incluyen organizadas por capítulos y en el formato [primer apellido del primer autor, año de publicación]. En el caso de coincidencia de referencias, se asignan letras al final de las mismas para diferenciarlas. En las referencias propias del autor, la distinción se realiza mencionando el lugar de publicación de la contribución, bien con el acrónimo del congreso o bien con el identificador de la revista.

6.1.1 Referencias del capítulo 1

- [Ambrosini, 2006] D. Ambrosini and P.K. Rastogi, Optical methods in heat transfer and fluid flow, Guest EDITORIAL, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 44, Issues 3-4, March-April 2006, pag. 155-158
- [Astarita, 2006] T. Astarita, G. Cardone and G.M. Carlomagno, Infrared thermography: An optical method in heat transfer and fluid flow visualisation, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 44, Issues 3-4, March-April 2006, pag. 261-281.
- [Balageas, 1987] D.L. Balageas, A.A. Déom, and D.M. Boscher, Characterization and Nondestructive Testing of Carbon-Epoxy Composites by a Pulsed Photothermal Method, *Mater. Eval.*, Vol 45, April 1987, p 461-465
- [Carlomagno, 1989] G.M. Carlomagno and L. de Luca, Infrared thermography in heat transfer. en: W.J. Yang, Editor, *Handbook of flow visualization*, Hemisphere, Washington (1989), pag. 531-553.
- [Cielo, 1987] P. Cielo X. Maldague, Alain A. Déom and R. Lewak, Thermographic Nondestructive Evaluation of Industrial Materials and Structures, *Mater.Eval.*, Vol 45, April 1987, p 452-460
- [Incropera, 1999] F.P Incropera, D.P. De Witt, *Fundamentos de Transferencia de Calor*, 4ª. Ed., Prentice Hall, México, 912 pag., 1999.
- [Potet, 1987] P. Potet, P. Jeanin, and C. Bathias, The Use of Digital Image Processing in Vibrothermographic Detection of Impact Damage in Composite Materials, *Mater. Eval.*, Vol 45, April 1987, p 466-470
- [Sigalés, 2003] B. Sigalés, *Transferencia de Calor Técnica*, Vol 1. Editorial Reverté, Barcelona, 926 pag., 2003.

6.1.2 Referencias del capítulo 2

- [Ammer, 2003] K. Ammer, Thermology 2002 - A computer-assisted literature survey, *Thermology International*, Vol. 13, Issue 1, páginas 10-27, 2003
- [Ammer, 2004] K. Ammer, Thermology 2003 - A computer-assisted literature survey with a focus on non medical applications of thermal imaging, *Thermology International*, Vol. 14, Issue 1, páginas 5-36, 2004
- [Ammer, 2005] K. Ammer, Thermology 2004 - A computer-assisted literature survey, *Thermology International*, Vol. 15, Issue 1, páginas 5-37, 2005
- [Ammer, 2006] K. Ammer, Thermology 2005 - A computer-assisted literature survey, *Thermology International*, Vol. 16, Issue 1, páginas 16-36, 2006
- [ASNT, 2001] 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.

- [Datskos, 2003] P.G. Datskos and N.V. Lavrik, "Detectors - Figures of Merit" in *Encyclopedia of Optical Engineering*, Ed. R. Driggers (Marcel Dekker, New York), pag. 349-357, 2003.
- [Ibarra, 2004] C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague, Pulsed Phase Thermographic Reviewed, *Qirt Journal*, vol. 1, no. 1, pag. 47-70, 2004.
- [Ibarra, 2005] C. Ibarra-Castanedo, *Quantitative Subsurface Defect Evaluation by Pulsed Phase Thermography: Depth Retrieval with the Phase*, Ph.D. thesis, Université Laval, 2005
- [Maldague, 2001] X.P.V. Maldague, *Theory and Practice of Infrared Technology For Nondestructive Testing*, Ed. John Wiley & Sons, New York, 684 páginas, 2001
- [Meola, 2004] C. Meola, G.M. Carlomagno, Recent Advances in the Use of Infrared Thermography, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 15, pag.27-58, 2004.
- [Rajic, 2002] N. Rajic, Principal Component Thermography For Flaw Contrast Enhancement and Flaw Depth Characterisation in Composite Structures, *Composite Structures*, vol. 58, issue 4, pag. 521-528, 2002.
- [Shepard, 2001] S.M. Shepard, Advances in Pulsed Thermography”, *Proc. SPIE-Thermosense XXIII*, vol. 4360, pag. 511-515, 2001.

6.1.3 Referencias del capítulo 3

- [ASNT, 2001] 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.
- [Busse, 1979] G. Busse, Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal, *Applied Physics Letters*, 35 (1979) 759-760.
- [Daniels, 2001] A. Daniels, *System Performance Parameters* in [ASNT, 2001].
- [Gonzalez, 2005-BINDT] D.A.Gonzalez, S.G.Pickering, D.P.Almond, A Low Cost Thermographic NDT System based on Long Pulse Excitation: Development and Evaluation, 44th Annual *British Conference on Non-Destructive Testing*, comunicación oral 6pag., Harrogate, United Kingdom, 2005
- [Ibarra, 2006] C. Ibarra-Castanedo, D. González, F. Galmiche, X.P. Maldague, A. Bendada, Discrete signal transforms as a tool for processing and analyzing pulsed thermographic data, *Proceeding of ThermoSense XXVIII* (SPIE Conference Number OR32-Part of SPIE's Defense & Security Symposium vol. 6205.), Orlando (Kissimmee) - Florida – USA, 2006
- [Inagaki, 2001] T. Inagaki, K. Kurokawa, *Calculation and Evaluation of Errors* in [ASNT, 2001].
- [Maldague, 1996] X. Maldague, S. Marinetti, Pulse phase infrared thermography, *Applied Physics*, vol. 79, pag. 2694-2698, 1996.
- [Maldague, 2001] X.P.V. Maldague, *Theory and Practice of Infrared Technology For Nondestructive Testing*, Ed. John Wiley & Sons, New York, 684 páginas, 2001
- [Martin, 2003] R.E. Martin, A.L. Gyekenyesi, S.M. Shepard, Interpreting the Results of Pulsed Thermography Data, *Materials Evaluation*, vol. 61 n. 5, pag. 611-616, 2003.
- [Vavilov, 2001] V.P. Vavilov, *Heat Conduction in Sound Solids* in [ASNT, 2001].
- [Williams, 2006] G. M. Williams, A. M. Barter, Dual-band MWIR/LWIR QWIP ratio radiometer for absolute skin temperature measurements, Thermosense XXVIII, *Proceedings of SPIE Vol. 6205*, pag. 62050M-1 a 13, 2006.
- [Zalameda, 2003] J.N. Zalameda, N. Rajic, W.P. Winfree, A comparison of image processing algorithms for thermal non-destructive evaluation, in: K.E. Orlando, X. Cramer, X. Maldague (Eds.), *SPIE Proc. Thermosense XXV*, vol. 5073, pag. 374-385, 2003.

6.1.4 Referencias del capítulo 4

- [Avdelidis, 2003] N.P. Avdelidis, B.C. Hawtin, D.P. Almond, “Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites”, *J. NDT & E Int.*, v. 36, pp. 433-439, 2003.

- [Carslaw, 1986] H.S. Carslaw and J.C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd edition, Oxford University Press, Oxford, 510 páginas, 1986.
- [Favro, 1998] L.D. Favro, X. Han, Thermal Wave Materials Characterization and Thermal Wave Imaging, en Birnbaum G., Auld B. A. (eds.): *Sensing for Materials Characterization, Processing and Manufacturing, ASNT TONES*, vol. 1, p. 399-415, 1998.
- [Fischler, 1981] M. Fischler and R. Bolles. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the Association for Computing Machinery*, 24(6):381–395., 1981.
- [Gonzalez, 1993] R.C. Gonzalez, R.E. Woods, "*Digital Image Processing*", Addison-Wesley Comp. 1993
- [Gonzalez, 2004-Odimap] D.A. González, C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague, F.J. Madruga, J.M. López-Higuera, Quantitative Characteristics of Subsurface Defects using an Automated Absolute Contrast Method, 4th Topical Meeting on Optoelectronic Distance/Displacement Measurements and Applications, Oulu (Finlandia), IEEE-LEOS, *ODIMAP IV Proceedings*, 2004.
- [Gonzalez, 2004-Qirt] D. A. González, C. Ibarra-Castanedo, M. Pilla, M. Klein, J.M. López-Higuera, X. Maldague, Automatic Interpolated Differentiated Absolute Contrast Algorithm for the Analysis of Pulsed Thermographic Sequences, *7th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, Rhode Saint Genèse (Bélgica), 2004
- [Gonzalez, 2005-IWASPNDE] D.A. González, C. Ibarra-Castanedo, J.M. López-Higuera, X. Maldague, New Algorithm based on the Hough Transform for the Analysis of Pulsed Thermographic Sequences, *Proceedings of Vth International Workshop Advances in Signal Processing for NDE*, Québec (Canada), 2005
- [Gonzalez, 2006-InfPhy] D.A. González, C. Ibarra-Castanedo, F.J. Madruga, X. Maldague, Differentiated Absolute Phase Contrast Algorithm for the Analysis of Pulsed Thermographic Sequences, *Infrared Physics & Technology*, vol. 48, pag. 16-21 2006.
- [Gonzalez, 2006-Thermosense] D.A. González, C. Ibarra-Castanedo, F.J. Madruga, X.P. Maldague, Analysis of Pulsed Thermographic Sequences based on Radon Transform, ThermoSense XXVIII (SPIE Conference Number OR32-Part of SPIE's Defense & Security Symposium), *Proceedings of Spie* Vol. 6205, Orlando (Kissimmee) - Florida – USA, 2006.
- [Hough, 1962] P.V.C. Hough, "*Methods and means for recognizing complex patterns*", US patent 3069654, 1962
- [Ibarra, 2004] C. Ibarra-Castanedo, D. González, X. Maldague, Automatic Algorithm for Quantitative Pulsed Phase Thermography Calculations, *Proceedings of 16th World Conference on Nondestructive Testing*, Montréal (Canada), 2004.
- [Ibarra, 2004b] C. Ibarra-Castanedo and X. Maldague, Pulsed Phased Thermography reviewed, *QIRT Journal*, volume 1, issues 1, pages 47-70, 2004.
- [Ibarra, 2005] C. Ibarra-Castanedo, *Quantitative Subsurface Defect Evaluation by Pulsed Phase Thermography: Depth Retrieval with the Phase*, Ph. D. thesis, Université Laval, 2005.
- [Ibarra, 2006] C. Ibarra-Castanedo, D. González, F. Galmiche, X.P. Maldague, A. Bendada, Discrete signal transforms as a tool for processing and analyzing pulsed thermographic data, *Proceeding of ThermoSense XXVIII* (SPIE Conference Number OR32-Part of SPIE's Defense & Security Symposium vol. 6205.), Orlando (Kissimmee) - Florida – USA, 2006
- [Maldague, 1996] X. Maldague, S. Marinetti, Pulse phase infrared thermography, *Applied Physics*, vol. 79, pag. 2694–2698, 1996.
- [Martin, 2003] R.E. Martin, A.L. Gyekenyesi, S.M. Shepard, Interpreting the Results of Pulsed Thermography Data, *Materials Evaluation*, vol. 61 n. 5, pag. 611-616, 2003.
- [Pilla, 2002] M.C. Pilla, *A Novel Contrast Method for Pulse Thermography Data*, M.Sc. Thesis, Politecnico di Milano, 2002.
- [Pratt, 1991] W.K. Pratt, "*Digital Image Processing*", Wiley&Sons, New York 1991

- [Rajic, 2002] N. Rajic, Principal Component Thermography For Flaw Contrast Enhancement and Flaw Depth Characterisation in Composite Structures, *Composite Structures*, vol. 58, issue 4, pag. 521-528, 2002.
- [Sakagami, 2002] T. Sakagami, S. Kubo, Development of a New Non-Destructive Technique for Quantitative Evaluations of Delamination Defects in Concrete Structures Based on Phase Delay Measurement using Lock-In Thermography, *Infrared Physics Technology*, vol. 43, pag. 211-218, 2002.
- [Toft, 1996] P. Toft, "The Radon Transform - Theory and Implementation", Ph.D. thesis - Department of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, June 1996, 326 pages.

6.2 Referencias ordenadas alfabéticamente

Igualmente, se incluye todas las referencias ordenadas alfabéticamente.

- [Almond, 1996] D.P. Almond, P.M. Patel, *Photothermal Science and Techniques*, Chapman & Hall, 1ª edición, 241 páginas, 1996.
- [Ambrosini, 2006] D. Ambrosini and P.K. Rastogi, Optical methods in heat transfer and fluid flow, Guest Editorial, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 44, Issues 3-4, March-April 2006, pag. 155-158
- [Ammer, 2003] K. Ammer, Thermology 2002 - A computer-assisted literature survey, *Thermology International*, Vol. 13, Issue 1, páginas 10-27, 2003
- [Ammer, 2004] K. Ammer, Thermology 2003 - A computer-assisted literature survey with a focus on non medical applications of thermal imaging, *Thermology International*, Vol. 14, Issue 1, páginas 5-36, 2004
- [Ammer, 2005] K. Ammer, Thermology 2004 - A computer-assisted literature survey, *Thermology International*, Vol. 15, Issue 1, páginas 5-37, 2005
- [Ammer, 2006] K. Ammer, Thermology 2005 - A computer-assisted literature survey, *Thermology International*, Vol. 16, Issue 1, páginas 16-36, 2006
- [ASNT, 2001] 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.
- [Astarita, 2006] T. Astarita, G. Cardone and G.M. Carlomagno, Infrared thermography: An optical method in heat transfer and fluid flow visualisation, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 44, Issues 3-4, March-April 2006, pag. 261-281.
- [Avdelidis, 2003] N.P. Avdelidis, B.C. Hawtin, D.P. Almond, "Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites", *J. NDT & E Int.*, v. 36, pp. 433-439, 2003.
- [Balageas, 1987] D.L. Balageas, A.A. Déom, and D.M. Boscher, Characterization and Nondestructive Testing of Carbon-Epoxy Composites by a Pulsed Photothermal Method, *Mater. Eval.*, Vol 45, April 1987, p 461-465
- [Bracewell, 1965] R. Bracewell, *The Fourier Transform and its Applications*, USA, McGraw-Hill, 1965.
- [Busse, 1979] G. Busse, Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal, *Applied Physics Letters*, 35 (1979) 759-760.
- [Carlomagno, 1976] G.M. Carlomagno, P.G. Berardi, in: C. Warren (Ed.), Unsteady Thermotopography in Non-Destructive Testing, *Proceedings of the III Infrared Information Exchange*, St. Louis, 1976, pp. 33-40.
- [Carlomagno, 1989] G.M. Carlomagno and L. de Luca, Infrared thermography in heat transfer. en: W.J. Yang, Editor, *Handbook of flow visualization*, Hemisphere, Washington (1989), pag. 531-553.

- [Carslaw, 1921] H.S. Carslaw, *Introduction to the mathematical theory of heat in solids*, Macmillan, pag. 268, 1921.
- [Carslaw, 1986] H.S. Carslaw and J.C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd edition, Oxford University Press, Oxford, 510 páginas, 1986.
- [Chandos, 1974] R.J. Chandos, R.E. Chandos, Radiometric Properties of Isothermal, Diffuse Wall Cavity Sources, *Applied Optics*, Vol.13, no.9, pag. 2142-2152, 1974.
- [Cielo, 1987] P. Cielo X. Maldague, Alain A. Déom and R. Lewak, Thermographic Nondestructive Evaluation of Industrial Materials and Structures, *Mater.Eval.*, Vol 45, April 1987, p 452-460
- [Cuccurullo, 2002] G. Cuccurullo, P. G. Berardi, R. Carfagna and V. Pierro IR temperature measurements in microwave heating, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 43, Issues 3-5, pag. 145-150, 2002.
- [Daniels, 2001] A. Daniels, *System Performance Parameters* in [ASNT, 2001].
- [Datskos, 2003] P.G. Datskos and N.V. Lavrik, "Detectors - Figures of Merit" in *Encyclopedia of Optical Engineering*, Ed. R. Driggers (Marcel Dekker, New York), pag. 349-357, 2003.
- [Dillenz, 2000] A. Dillenz, D. Wu, K. Breitrück, and G. Busse, Lock-in thermography for depth resolved defect characterisation, *Proceedings of the 15th World Conference on Non-Destructive Testing in Rome*, 2000.
- [Favro, 1998] L.D. Favro, X. Han, Thermal Wave Materials Characterization and Thermal Wave Imaging, en Birnbaum G., Auld B. A. (eds.): *Sensing for Materials Characterization, Processing and Manufacturing*, ASNT TONES, vol. 1, p. 399-415, 1998.
- [Fischler, 1981] M. Fischler and R. Bolles. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the Association for Computing Machinery*, 24(6):381-395., 1981.
- [Galmiche, 2000] F. Galmiche, X. Maldague, Depth defect retrieval using the wavelet pulsed phased thermography, *Proceedings de QIRT 6*, Eurotherm Seminar 64, D. Balageas, G. Busse, C. Carlomagno (eds.), Reims, France, pag. 194-199, 2000.
- [Gonzalez, 1993] R.C. Gonzalez, R.E. Woods, "*Digital Image Processing*", Addison-Wesley Comp. 1993
- [Gonzalez, 2004-Odimap] D.A. González, C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague, F.J. Madruga, J.M. López-Higuera, Quantitative Characteristics of Subsurface Defects using an Automated Absolute Contrast Method, 4th Topical Meeting on Optoelectronic Distance/Displacement Measurements and Applications, Oulu (Finlandia), IEEE-LEOS, *ODIMAP IV Proceedings*, 2004.
- [Gonzalez, 2004-Qirt] D. A. González, C. Ibarra-Castanedo, M. Pilla, M. Klein, J.M. López-Higuera, X. Maldague, Automatic Interpolated Differentiated Absolute Contrast Algorithm for the Analysis of Pulsed Thermographic Sequences, *7th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, Rhode Saint Genèse (Bélgica), 2004
- [Gonzalez, 2005-BINDT] D.A.Gonzalez, S.G.Pickering, D.P.Almond, A Low Cost Thermographic NDT System based on Long Pulse Excitation: Development and Evaluation, 44th Annual *British Conference on Non-Destructive Testing*, comunicación oral 6pag., Harrogate, United Kingdom, 2005
- [Gonzalez, 2005-IWASPNDI] D.A. González, C. Ibarra-Castanedo, J.M. López-Higuera, X. Maldague, New Algorithm based on the Hough Transform for the Analysis of Pulsed Thermographic Sequences, *Proceedings of Vth International Workshop Advances in Signal Processing for NDE*, Québec (Canada), 2005
- [Gonzalez, 2005-NDTE] D.A. González, F.J. Madruga, M. A. Quintela, J.M. López-Higuera, Defect assessment on radiant heaters using infrared thermography, *NDT&E Internacional*, vol. 38, n. 6, pag. 428- 432, 2005.
- [González, 2005-Orlando] D.A. González, F.J. Madruga, C. Ibarra-Castanedo*, O. Conde, J.M. López-Higuera, Quality Control on Radiant Heaters Manufacture, ThermoSense XXVIII

- (SPIE Conference Number OR32-Part of SPIE's Defense & Security Symposium) vol. 6205, Orlando (Kissimmee) - Florida – USA, 2006.
- [González, 2005-Varsovia] D.A. González, F.J. Madruga, M. A. Quintela, J.M. López-Higuera, Quality Control of Radiant Heaters, *Proceedings de International Congress on Optics and Optoelectronics*, Warsaw (Poland), 2005.
- [Gonzalez, 2006-InfPhy] D.A. González, C. Ibarra-Castanedo, F.J. Madruga, X. Maldague, Differentiated Absolute Phase Contrast Algorithm for the Analysis of Pulsed Thermographic Sequences, *Infrared Physics & Technology*, vol. 48, pag. 16-21, 2006.
- [Gonzalez, 2006-Thermosense] D.A. González, C. Ibarra-Castanedo, F.J. Madruga, X.P. Maldague, Analysis of Pulsed Thermographic Sequences based on Radon Transform, ThermoSense XXVIII (SPIE Conference Number OR32-Part of SPIE's Defense & Security Symposium), *Proceedings of Spie* Vol. 6205, Orlando (Kissimmee) - Florida – USA, 2006.
- [Holman, 1998] J.P. Holman, *Transferencia de Calor*, Ed. McGrawHill, pag. 504, 1998.
- [Holst, 2000] G.C. Holst, *Common sense approach to thermal imaging*, Copublicado por JCD Publishing y SPIE- The International Society for Optical Engineering, 377 páginas, 2000.
- [Hough, 1962] P.V.C. Hough, "*Methods and means for recognizing complex patterns*", US patent 3069654, 1962
- [Ibarra, 2004] C. Ibarra-Castanedo, D. González, X. Maldague, Automatic Algorithm for Quantitative Pulsed Phase Thermography Calculations, *Proceedings of 16th World Conference on Nondestructive Testing*, Montréal (Canada), 2004.
- [Ibarra, 2004b] C. Ibarra-Castanedo and X. Maldague, Pulsed Phased Thermography reviewed, *QIRT Journal*, volume 1, issues 1, pages 47-70, 2004.
- [Ibarra, 2004-Pune] C. Ibarra-Castanedo, D. González and X. Maldague, Infrared Image Processing for Nondestructive Applications, Keynote lecture, NDE 2004 National Indian Society annual conference, Pune (India), 25 p., 2004.
- [Ibarra, 2005] C. Ibarra-Castanedo, Quantitative Subsurface Defect Evaluation by Pulsed Phase Thermography: Depth Retrieval with the Phase, Ph. D. thesis, Université Laval, 2005.
- [Ibarra, 2006] C. Ibarra-Castanedo, D. González, F. Galmiche, X.P. Maldague, A. Bendada, Discrete signal transforms as a tool for processing and analyzing pulsed thermographic data, *Proceeding of ThermoSense XXVIII* (SPIE Conference Number OR32-Part of SPIE's Defense & Security Symposium vol. 6205.), Orlando (Kissimmee) - Florida – USA, 2006
- [Inagaki, 2001] T. Inagaki, K. Kurokawa, *Calculation and Evaluation of Errors* in [ASNT, 2001].
- [Incropera, 1999] F.P. Incropera, D.P. De Witt, *Fundamentos de Transferencia de Calor*, 4ª. Ed., Prentice Hall, México, 912 pag., 1999.
- [Kaplan, 1999] H. Kaplan, *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment*, Segunda Edición, Tutorial Texts in Optical Engineering, SPIE PRESS, Vol. TT34, 164 páginas, 1999.
- [Madruga, 2001-OdimapIII] F.J. Madruga, D. González, V. Alvarez, J. Echevarria, Javier Hierro* & J.M. López-Higuera, "Longitudinal "Scale" defects detection on steel bar production industry", IEEE-LEOS, *ODIMAP III Proceedings*, Pavia, Italia. Septiembre 2001.
- [Madruga, 2002-ECNDT] F.J. Madruga, V. Álvarez, D. González, M. Angeles Quintela, Javier Hierro*, J.M. López-Higuera, "Non-Contact Measurement Of High Temperature On Steel Bar Production Industry Using Fiber Optic Sensing Technology", *8th. ECNDT Proceedings*, Barcelona, España, Junio 2002
- [Madruga, 2002-OFS] F.J. Madruga, D. González, V. Álvarez, Juan Echevarria, Olga M. Conde, J.M. López-Higuera, "Field Test Of Non Contact High Temperature Fiber Optic Transducer In A Steel Production Plant ", OFS'2002, 15th International Conference on optical Fiber Sensors, *15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, Portland, USA, Mayo 2002

- [Maldague, 1996] X. Maldague, S. Marinetti, Pulse phase infrared thermography, *Applied Physics*, vol. 79, pag. 2694–2698, 1996.
- [Maldague, 2000] X. Maldague, Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation, *Trends in optical non-destructive testing and inspection*, editors P. Rastogi y D. Inaudi, Elsevier, páginas 591-609, 2000.
- [Maldague, 2001] X.P.V. Maldague, *Theory and Practice of Infrared Technology For Nondestructive Testing*, Ed. John Wiley & Sons, New York, 684 páginas, 2001
- [Martin, 2003] R.E. Martin, A.L. Gyekenyesi, S.M. Shepard, Interpreting the Results of Pulsed Thermography Data, *Materials Evaluation*, vol. 61 n. 5, pag. 611-616, 2003.
- [Meola, 2004] C. Meola, G.M. Carlomagno, Recent Advances in the Use of Infrared Thermography, *Measurement Science Technology*, vol. 15, p.27–58, 2004.
- [Pilla, 2002] M.C. Pilla, *A Novel Contrast Method for Pulse Thermography Data*, M.Sc. Thesis, Politecnico di Milano, 2002.
- [Potet, 1987] P. Potet, P. Jeanin, and C. Bathias, The Use of Digital Image Processing in Vibrothermographic Detection of Impact Damage in Composite Materials, *Mater. Eval.*, Vol. 45, pag. 466-470, 1987
- [Pratt, 1991] W.K. Pratt, "*Digital Image Processing*", Wiley&Sons, New York 1991
- [Rajic, 2002] N. Rajic, Principal Component Thermography For Flaw Contrast Enhancement and Flaw Depth Characterisation in Composite Structures, *Composite Structures*, vol. 58, issue 4, pag. 521-528, 2002.
- [Sakagami, 2002] T. Sakagami, S. Kubo, Development of a New Non-Destructive Technique for Quantitative Evaluations of Delamination Defects in Concrete Structures Based on Phase Delay Measurement using Lock-In Thermography, *Infrared Physics Technology*, vol. 43, pag. 211-218, 2002.
- [Salamander] Salamander Ceramic Infrared Emitters Technical Manual.
- [Shepard, 2001] S. M. Shepard, "Advances in Pulsed Thermography", *Proc. SPIE, Thermosense XXIII*, vol. 4360, pag. 511-515, 2001.
- [Sigalés, 2003] B. Sigalés, *Transferencia de Calor Técnica*, Vol 1. Editorial Reverté, Barcelona, 926 pag., 2003.
- [Toft, 1996] P. Toft, "*The Radon Transform - Theory and Implementation*", Ph.D. thesis - Department of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, June 1996, 326 pages.
- [Tong, 1996] L.Tong, Y. Shen, R. Xu, Z. Ding, Study on Frequency Response Characteristics of High-temperature Fiber Optic Sensor Head, *Fiber Optic Sensors V, Proc. Spie*, Vol.2895, pag. 431-434, 1996.
- [Vavilov, 2001] V.P. Vavilov, *Heat Conduction in Sound Solids* in [ASNT, 2001].
- [Webster, 1999] Varios autores, Temperature Measurement, Mechanical Variables Measurement – Thermal, editor J.G. Webster, *The measurement, instrumentation and sensors handbook*, Copublicado por CRC Press LLC y Springer-Verlag GmbH & Co. KG, USA, 1999.
- [Williams, 2006] G. M. Williams, A. M. Barter, Dual-band MWIR/LWIR QWIP ratio radiometer for absolute skin temperature measurements, *Thermosense XXVIII, Proceedings of SPIE Vol. 6205*, pag. 62050M-1 a 13, 2006.
- [Zalameda, 2003] J.N. Zalameda, N. Rajic, W.P. Winfree, A comparison of image processing algorithms for thermal non-destructive evaluation, in: K.E. Orlando, X. Cramer, X. Maldague (Eds.), *SPIE Proc. Thermosense XXV*, vol. 5073, pag. 374–385, 2003.
- [Zur, 1992] A.Zur, A.Katzir, Theory of noncontact point thermal sensing by fiber-optic radiometry, *Applied Optics*, Vol. 31, No. 1, pag. 55-68, 1992.

6.3 Contribuciones del doctorando consecuencia de la tesis

Esta obra ha sido la fuente de varias contribuciones científicas. Han surgido fruto de las colaboraciones que el autor ha mantenido a lo largo de los años. En primer lugar se resumen en una tabla y seguidamente se agrupan y se ofrece algún detalle de interés para una mejor estructuración de los trabajos de investigación realizados.

Tabla 6-1. Cuadro resumen de publicaciones consecuencia de la tesis.

Tipo Publicaciones		Número de contribuciones		
		TI	Otras	
Internacionales	Capítulos de Libros	1	-	1
	Revistas	6	2	8
	Congresos Internacionales	20	7	27
Nacionales	Congresos Nacionales	3	6	9
Suma parcial		30	15	
TOTAL		45		

6.3.1 Contribuciones en el campo de la termografía infrarroja

En colaboración con el *Laboratoire de Vision et Systèmes Numériques de l'Université Laval* en Québec, Canadá, diferentes formas de procesado de secuencias termográficas han sido desarrolladas. Con la estrecha cooperación con el Dr. Clemente Ibarra Castanedo y el Professor Xavier Maldague, se desarrollaron algoritmos que permiten la automatización de la toma de decisiones en la detección y evaluación de defectos subsuperficiales en especímenes de diversa composición. Así, se trataron métodos de interpolación de las evoluciones temporales de la temperatura superficial de los objetos bajo inspección (contribuciones 2, 5, 6, 7, 9), la aplicación de transformadas diversas a dichos perfiles temporales (contribuciones 1, 4, 10, 12, 13) y la fusión de técnicas de procesado de la señal y procesado de imágenes con el uso de múltiples transformadas para la extracción de los datos y para la automatización de las decisiones (contribuciones 3, 8, 11).

CAPITULOS DE LIBROS

- Autores (p.o. de firma): Clemente Ibarra-Castanedo, Daniel A. González, François Galmiche, Abdelhakim Bendada and Xavier P. Maldague
Título: On signal transforms applied to pulsed thermography
Lugar de publicación: Recent Research Developments in Applied Physics, 9 (2006)
Referencia: ISBN: 81-7895-213-0

PUBLICACIONES EN REVISTAS INTERNACIONALES

- Autores (p.o. de firma): C. Ibarra-Castanedo, D. González, M. Klein, M. Pilla, S. Vallerand and X. Maldague
Título: "Infrared image processing and data analysis"
Lugar de publicación: Infrared Physics & Technology

Volumen: 46, n.1-2 Páginas, inicial: 75 final: 83 Fecha: Dec 2004
Referencia: ISSN: 1350-4495

3. Autores (p.o. de firma): D.A. González, C. Ibarra-Castanedo, F.J. Madruga, X. Maldague
Título: "Differentiated Absolute Phase Contrast Algorithm for the Analysis of Pulsed Thermographic Sequences"
Lugar de publicación: Infrared Physics & Technology
Volumen: 48 Páginas, inicial: 16 final: 21 Fecha: 2006
Referencia: ISSN: 1350-4495
4. Autores (p.o. de firma): D.A. González, C. Ibarra-Castanedo, J.M. López-Higuera, X. Maldague
Título: "New Algorithm based on the Hough Transform for the Analysis of Pulsed Thermographic Sequences"
Lugar de publicación: NDT&E
Volumen: 39 Páginas, inicial: 617 final: 621 Fecha: 2006
Referencia: ISSN: 0963-8695

COMUNICACIONES PRESENTADAS A CONGRESOS INTERNACIONALES

5. Autores: C. Ibarra-Castanedo, D. González, M. Klein, M. Pilla, S.P. Vallerand, X. Maldague
Título: "Infrared Image Processing and Data Analysis"
Tipo de Participación: Comunicación
Congreso: 7th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications
Lugar celebración: Pisa, Italia Fecha: Septiembre 2003
6. Autores: D.A. González, C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague, F.J. Madruga, J.M. López-Higuera
Título: "Quantitative Characteristics of Subsurface Defects using an Automated Absolute Contrast Method"
Tipo de Participación: Póster
Congreso: 4th Topical Meeting on Optoelectronic Distance/Displacement Measurements and Applications
Lugar celebración: Oulu, Finland Fecha: Junio 2004
IEEE-LEOS, ODIMAP IV Proceedings,
ISBN-951-42-7368-0, 2004
7. Autores: D. A. González, C. Ibarra-Castanedo, M. Pilla, M. Klein, J.M. López-Higuera, X. Maldague
Título: "Automatic Interpolated Differentiated Absolute Contrast Algorithm for the Analysis of Pulsed Thermographic Sequences"
Tipo de Participación: Póster
Congreso: 7th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography
Lugar celebración: Rhode Saint Genèse, Belgium Fecha: Julio 2004
8. Autores: C. Ibarra-Castanedo, D. González and X. Maldague
Título: "Automatic Algorithm for Quantitative Pulsed Phase Thermography Calculations"
Tipo de Participación: Comunicación
Congreso: 16th World Conference on Nondestructive Testing
Lugar celebración: Montréal, Canada Fecha: Agosto 2004
9. Autores: C. Ibarra-Castanedo, D. González and X. Maldague
Título: "Infrared Image Processing for Nondestructive Applications"
Tipo de Participación: Keynote lecture, 25 p.
Congreso: NDE 2004 National Indian Society annual conference
Lugar celebración: Pune, India Fecha: 9-11 Dic. 2004
10. Autores: D.A. González, C. Ibarra-Castanedo, J.M. López-Higuera, X. Maldague
Título: "New Algorithm based on the Hough Transform for the Analysis of Pulsed Thermographic Sequences"
Tipo de Participación: Comunicación oral 6p.
Congreso: Vth International Workshop Advances in Signal Processing for NDE
Lugar celebración: Québec, Canada Fecha: 2-5 Agos. 2005
11. Autores: Clemente Ibarra Castanedo, Daniel A. González, Hakim Bendada, Xavier Maldague

Título: Análisis de imágenes en Termografía Infrarroja
Tipo de Participación: Comunicación 5p.
Congreso: X Simposio de Tratamiento de Señales, Imágenes y Visión Artificial
Lugar celebración: Cali- Colombia Fecha: 14-16 Sept 2005

12. Autores: Daniel A. González, Clemente Ibarra-Castanedo, Francisco J. Madruga, Xavier P. Maldague.

Título: Analysis of Pulsed Thermographic Sequences based on Radon Transform
Tipo de Participación: Poster 8p.
Congreso: ThermoSense XXVIII (SPIE Conference Number OR32-Part of SPIE's Defense & Security Symposium)
Lugar celebración: Orlando (Kissimmee) - Florida - Fecha: 17-21 April
USA 2006

13. Autores: Ibarra-Castanedo C., González D., Galmiche F., Maldague X. P., Bendada A.

Título: Discrete signal transforms as a tool for processing and analyzing pulsed thermographic data
Tipo de Participación: Poster 8p.
Congreso: ThermoSense XXVIII (SPIE Conference Number OR32-Part of SPIE's Defense & Security Symposium)
Lugar celebración: Orlando (Kissimmee) - Florida - Fecha: 17-21 April
USA 2006

La siguiente contribución fue fruto de una visita al *Materials Research Centre* del *Department of Mechanical Engineering* de la *Universidad de Bath* en el Reino Unido bajo la supervisión del Professor D.P. Almond. En este laboratorio se desarrolló un prototipo de sistema termográfico basado en pulsos luminosos de larga duración y en una cámara miniatura. La publicación recoge una comparativa empírica entre este sistema de bajo coste y otro comercial (ThermoScope de TWI. Inc.) en términos de detectabilidad de defectos subsuperficiales.

COMUNICACIONES PRESENTADAS A CONGRESOS INTERNACIONALES

14. Autores: D.A.Gonzalez, S.G.Pickering and D.P.Almond
Título: "A Low Cost Thermographic NDT System based on Long Pulse Excitation: Development and Evaluation"
Tipo de Participación: Comunicación oral 6p.
Congreso: 44th Annual British Conference on Non-Destructive Testing
Lugar celebración: Harrogate, United Kingdom Fecha: 13-15 Sep. 2005

Fruto de los trabajos desarrollados en el proyecto FEDER "SOTEPAC", colaboración entre el Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria y la empresa Global Steel Wire S.A., los siguientes artículos recogen la investigación (15, 16, 17, 22, 23), desarrollo (18, 19) y prueba de campo (20, 21) de un sistema sensor de alta temperaturas basado en fibra óptica para la monitorización de una colada de acero.

PUBLICACIONES EN REVISTAS INTERNACIONALES

15. Autores (p.o. de firma): Francisco J. Madruga, Daniel A. González, J. M. López-Higuera
Título: "Error Estimation in a Fiber Optic Dual Waveband Ratio Pyrometer"
Lugar de publicación: IEEE Sensors Journal
Volumen: 4, nº 3 Páginas, inicial: 288 final: 293 Fecha: Jun 2004
Referencia: ISSN: 1530-437X

COMUNICACIONES PRESENTADAS A CONGRESOS INTERNACIONALES

16. Autores: José M. López-Higuera, Francisco J. Madruga, Daniel A. González, Víctor Álvarez & Javier Hierro

- Título: "High temperature optical fiber transducer for a smart structure on iron-steel production industry"
 Tipo de Participación: Póster
 Congreso: SPIE's 8th Annual Int'l Symp. on Smart Structures and Materials
 Lugar celebración: Newport Beach, Los Angeles, California, USA Fecha: Marzo 2001
 Proceedings of SPIE-The international Society for Optical Engineering.
 Vol. 4328, ISSN: 0277-786X, ISBN: 0-8194-4014-0, 2001.
17. Autores: F.J. Madruga, D. González, V. Alvarez, J. Echevarria, Javier Hierro* & J.M. López-Higuera
 Título: "Longitudinal "Scale" defects detection on steel bar production industry"
 Tipo de Participación: Póster
 Congreso: ODIMAP III
 Lugar celebración: Pavia, Italia Fecha: Septiembre 2001
 IEEE-LEOS, ODIMAP III Proceedings,
 ISBN-88-87 237-06-9-2, 2001
18. Autores: J.M. López-Higuera, F.J. Madruga, D. González, V. Alvarez, and Javier Hierro*
 Título: "No contact high temperature fiber optic sensor system on steel bar production industry"
 Tipo de Participación: Póster
 Congreso: PLAN conference
 Lugar celebración: Santander, España Fecha: Octubre 2001
19. Autores: F.J. Madruga, V. Álvarez, D. González, Juan Echevarria , J.M. López-Higuera
 Título: "Optical Fiber Transducer For Monitoring The Cooling Profile Of Iron-Steel Bars"
 Tipo de Participación: Póster
 Congreso: Smart Structures and Materials and NDE for Health Monitoring and Diagnosis
 Lugar celebración: San Diego (California), USA Fecha: Marzo 2002
 Proceedings of SPIE Vol. 4694, ISBN: 0-8194-4442-1, 2002
20. Autores: F.J. Madruga, D. González, V. Álvarez, Juan Echevarria, Olga M. Conde, J.M. López-Higuera
 Título: "Field Test Of Non Contact High Temperature Fiber Optic Transducer In A Steel Production Plant "
 Tipo de Participación: Póster
 Congreso: OFS'2002, 15th International Conference on optical Fiber Sensors
 Lugar celebración: Portland, USA Fecha: Mayo 2002
 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest
 ISBN: 0-7803-7289-1, 2002.
21. Autores: F.J. Madruga, V. Álvarez, D. González, M. Angeles Quintela, Javier Hierro*, J.M. López-Higuera
 Título: "Non-Contact Measurement Of High Temperature On Steel Bar Production Industry Using Fiber Optic Sensing Technology"
 Tipo de Participación: Póster
 Congreso: 8th. ECNDT
 Lugar celebración: Barcelona, España Fecha: Junio 2002
 ISBN: 84-699-8573-6, 2002.

COMUNICACIONES PRESENTADAS A CONGRESOS NACIONALES

22. Autores: F.J. Madruga, D.A. González, V. Álvarez, O. Conde, M. Lomer J.M. López Higuera
 Título: "Transductor de fibra óptica para la medida de alta temperatura en procesos automatizados de producción de acero"
 Tipo de Participación: Póster
 Congreso: OPTOEL01
 Lugar celebración: Barcelona Fecha: Julio 2001
23. Autores: F.J. Madruga, D.A. González, M. Quintela, M. Lomer, C. Jauregui, J.M. López-Higuera
 Título: "Transductor de fibra óptica para la medida de altas temperaturas"
 Tipo de Participación: Comunicación
 Congreso: URSI'2002, XVII Simposium Nacional Unión Científica Internacional de Radio

Lugar celebración: Alcalá de Henares
ISBN: 84-8138-517-4, 2002

Fecha: Septiembre 2002

Los resultados más relevantes de los trabajos desarrollados en el proyecto "ECOPLEI", colaboración entre el Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria y la empresa Equipos Nucleares S.A., recogen la monitorización del proceso de enfriamiento del colado de plomo en contenedores de combustible nuclear a través de termografía infrarroja.

PUBLICACIONES EN REVISTAS INTERNACIONALES

24. Autores (p.o. de firma): Francisco J. Madruga, Daniel A. González, Jesus M. Mirapeix, José M. López Higuera
Título: "Application of infrared thermography to the fabrication process of nuclear fuel containers"
Lugar de publicación: NDT&E International
Volumen: 38, n. 5 Páginas, inicial: 397 final: 401 Fecha: Julio 2005
Referencia: ISSN: 0963-8695

Los siguientes artículos recogen las contribuciones científicas aportadas como consecuencia de los trabajos realizados consecuencia de la propuesta de Proyecto – Colaboración con la empresa EIKA. La aplicación de técnicas de procesado de señal e imagen permiten la localización e identificación de defectos en vitrocerámicas que facilitan la evaluación de su calidad.

PUBLICACIONES EN REVISTAS INTERNACIONALES

25. Autores (p.o. de firma): D.A. González, F.J. Madruga, M. A. Quintela, J.M. López-Higuera
Título: "Defect assessment on radiant heaters using infrared thermography"
Lugar de publicación: NDT&E International
Volumen: 38, n. 6 Páginas, inicial: 428 final: 432 Fecha: Septiembre 2005
Referencia: ISSN: 0963-8695

COMUNICACIONES PRESENTADAS A CONGRESOS INTERNACIONALES

26. Autores: Daniel Aquilino Gonzalez, Francisco Javier Madruga, Maria Angeles Quintela, Jose Miguel López-Higuera
Título: "Quality Control of Radiant Heaters"
Tipo de Participación: Poster 8p.
Congreso: International Congress on Optics and Optoelectronics
Lugar celebración: Warsaw, Poland Fecha: 28 Agos-2 Sep. 2005
27. Autores: Daniel A. González, Francisco J. Madruga, Clemente Ibarra-Castanedo*, Olga Conde, Jose M. López-Higuera
Título: Quality Control on Radiant Heaters Manufacture
Tipo de Participación: Poster 8p.
Congreso: ThermoSense XXVIII (SPIE Conference Number OR32-Part of SPIE's Defense & Security Symposium)
Lugar celebración: Orlando (Kissimmee) - Florida - USA Fecha: 17-21 April 2006
28. Autores: Francisco J. Madruga, Daniel A. Gonzalez, Jesus Mirapeix, Cesar Jauregui, Jose M. Lopez-Higuera
Título: Automatic detection of defects on radiant heaters based on infrared radiation.
Tipo de Participación: Poster 8p.
Congreso: 9th European Conference on Non-Destructive Testing
Lugar celebración: Berlin - Alemania Fecha: 25-29 Sept 2006

29. Autores: D.A. González, M. Lomer, N. Becue, A. Quintela, F.J. Madruga, J.M. López-Higuera
 Título: Fast Automatic Quality Control on Radiant Heaters
 Tipo de Participación: Poster 6p.
 Congreso: V Odimap
 Lugar celebración: Madrid - España Fecha: 2-4 Oct 2006

COMUNICACIONES PRESENTADAS A CONGRESOS NACIONALES

30. Autores: Daniel A. González, Clemente Ibarra Castanedo, Francisco J. Madruga, Jose M. Lázaro, Jose M. López-Higuera
 Título: Procesado de medidas en el infrarrojo para la evaluación-prueba no destructiva
 Tipo de Participación: Oral 4p.
 Congreso: Ursi 2006
 Lugar celebración: Oviedo - España Fecha: 12-15 Sept 2006

6.3.2 Contribuciones en el campo de la medida de diferentes magnitudes mediante dispositivos ópticos

El siguiente grupo de publicaciones hacen referencia a los trabajos que el autor ha realizado en la medida de diversas magnitudes con dispositivos ópticos, principalmente fibra óptica.

PUBLICACIONES EN REVISTAS INTERNACIONALES

Autores (p.o. de firma): D.A. González, J.L Arce-Diego, A. Cobo, J.M. López-Higuera
 Título: "Spectral modelling of curved long-period fibre gratings"
 Lugar de publicación: Measurement Science and Technology
 Volumen: 12, nº 7 Páginas, inicial: 786 final: 792 Fecha: Julio 2001
 Referencia: 0957-0233(01)20793-0.

Autores (p.o. de firma): J.M. López-Higuera, A. Cobo, O.M. Conde, F.J. Madruga, C. Jáuregui, A. Quintela, M. Lomer, M. Quintela, D.A. González, J. Echevarría, J. Mirapeix
 Título: "Photonic Engineering Group of the University of Cantabria: Recent R&D Contributions in Photonic Sensing Technology"
 Lugar de publicación: Journal of Fiber and Integrated Optics
 Volumen: 23, n. 2-3 Páginas, inicial: 207 final: 229 Fecha: 2004
 Referencia: ISSN 0146-8030

COMUNICACIONES PRESENTADAS A CONGRESOS INTERNACIONALES

Autores: J.L Arce-Diego, D.A. González-Fernández, A. Cobo, J.M. López-Higuera
 Título: "Spectral Characteristics of Curved SPFBG"
 Tipo de Participación: Póster
 Congreso: WFOPC'2000, Workshop on Fibre Optic Passive Components
 Lugar celebración: Pavía, Italia Fecha: Junio 2000
 IEEE-LEOS, WFOPC Proceedings
 ISBN-88-87 237-08-5, 2000.

Autores: J.L Arce-Diego, D.A. González-Fernández, M. A. Quintela, F. J. Madruga, J.M. López-Higuera
 Título: "Spectral Characteristics of Curved Long Period Fiber Gratings"
 Tipo de Participación: Póster
 Congreso: OFS'2000, 14th International Conference on optical Fiber Sensors
 Lugar celebración: Venecia, Italia Fecha: Octubre 2000
 Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering .
 Vol. 4185, ISSN: 0277-786X, ISBN: 0-8194-3248-0, 2000.

Autores: Jose L. Arce-Diego, Jorge González-García, David Pereda-Cubián, Daniel A. González-Fernández
 Título: "Optical Fiber Transducer based on LPFG and Microbends for Multi-Parameter Sensing"
 Tipo de Participación: Póster
 Congreso: The 14th Annual Meeting of the IEEE Lasers & Electro-Optics Society

Lugar celebración: San Diego (California), USA Fecha: Noviembre 2001
IEEE/LEOS Annual Meeting Conference Proceedings
Vol. 1, ISSN: 1092-8081, ISBN: 0-7803-7105-4, 2001.

Autores: D.A. González, C. Jáuregui, A. Quintela, F.J. Madruga, P. Marquez, J.M. López-Higuera
Título: "Torsion-induced Effects on UV-Long Period Fiber Gratings"
Tipo de Participación: Póster
Congreso: Second European Workshop on Optical Fibre Sensors
Lugar celebración: Santander, España Fecha: Junio 2004
Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering .
Vol. 5502, ISSN: 0277-786X, ISBN: 0-8194-5434-6, 2004.

Autores: C. Jáuregui, D.A. González, M.A. Quintela, P. Márquez, A.Cobo, J.M. López-Higuera
Título: "Virtual Long Period Fiber Gratings"
Tipo de Participación: Póster
Congreso: Second European Workshop on Optical Fibre Sensors
Lugar celebración: Santander, España Fecha: Junio 2004
Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering .
Vol. 5502, ISSN: 0277-786X, ISBN: 0-8194-5434-6, 2004.

Autores: M.A. Quintela, D.A. González, F.J. Madruga, M. Lomer, J.M. López-Higuera
Título: "Pump tuning of an erbium doped-fiber LPG"
Tipo de Participación: Póster
Congreso: Second European Workshop on Optical Fibre Sensors
Lugar celebración: Santander, España Fecha: Junio 2004
Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering .
Vol. 5502, ISSN: 0277-786X, ISBN: 0-8194-5434-6, 2004.

Autores: A. Cobo, J.M. López-Higuera, D.A. González, F. Bardin, D.P. Hand, J.D.C. Jones
Título: "Optoelectronic Unit for a Laser Welding Monitoring System"
Tipo de Participación: Poster 3p. (908-910).
Congreso: IEEE Sensors 2004
Lugar celebración: Viena, Austria Fecha: 24-27 Oct. 2004
ISBN:0-7803-8693-0

COMUNICACIONES PRESENTADAS A CONGRESOS NACIONALES

Autores: D.A. González-Fernández, J.L Arce-Diego, A. Cobo, J.M. López-Higuera
Título: "Revisión del efecto de las curvaturas en fibras ópticas"
Tipo de Participación: Comunicación
Congreso: URSI'2000, XIV Simposium Nacional Unión Científica Internacional de Radio
Lugar celebración: Zaragoza Fecha: Septiembre 2000

Autores:
Título: "Unidad de interrogación de redes de Bragg de bajo coste usando el borde de responsividad de fotodiodos semiconductores"
Tipo de Participación: Comunicación
Congreso: URSI'2000, XIV Simposium Nacional Unión Científica Internacional de Radio
Lugar celebración: Fecha: Septiembre 2000

Autores: D.A. González, A. Quintela, A. Campo, J.M. Mirapeix, J.M. López-Higuera
Título: "Estudio del comportamiento a alta temperatura de las Redes de Difracción en Fibras Ópticas"
Tipo de Participación: Comunicación
Congreso: URSI'2003, XVIII Simposium Nacional Unión Científica Internacional de Radio
Lugar celebración: A Coruña Fecha: Septiembre 2003
ISBN: 84-9749-081-9, 2003

Autores: A. Quintela, D.A. González, S.W. James, O.M. Conde, J.M. López-Higuera
Título: "Efecto de una película fina depositada sobre un LPG en la medida del índice externo."
Tipo de Participación: Comunicación
Congreso: URSI'2003, XVIII Simposium Nacional Unión Científica Internacional de Radio

Lugar celebración: A Coruña Fecha: Septiembre 2003
ISBN: 84-9749-081-9, 2003

Autores: J.M. López-Higuera, A. Cobo, O.M. Conde, M. Lomer, F.J. Madruga, M. A. Quintela, C. Jáuregui, A. Quintela, D.A. González, J.Echevarría y J. Mirapeix
Título: "Grupo de ingeniería fotónica: Resultados más significativos de sus líneas de i+d en curso"
Tipo de Participación: Póster
Congreso: 7ª Reunión Nacional de Óptica
Lugar celebración: Santander Fecha: Septiembre 2003
ISBN: 84-8102-348-5, 2003

Autores: A. Quintela, D.A. Gonzalez Fernández, O. M. Conde, S.W. James, J.M. López Higuera
Título: "Medida del índice de refracción de un medio externo mediante redes de difracción de periodo largo en fibra óptica"
Tipo de Participación: Póster
Congreso: 7ª Reunión Nacional de Óptica
Lugar celebración: Santander Fecha: Septiembre 2003
ISBN: 84-8102-348-5, 2003

- A. Principios fundamentales de la Física del calor*
- B. Conocimientos y técnicas claves en termografía infrarroja*
- C. Aplicaciones industriales de la termografía infrarroja*
- D. Técnicas de procesamiento de imágenes en secuencias termográficas*
- E. Algoritmos de detección de patrones lineales*
- F. Equipamiento utilizado*

A Principios fundamentales de la Física del calor

Las leyes de la termodinámica tratan de la transferencia de energía, pero siempre se refieren a *sistemas que están en equilibrio* y sólo pueden utilizarse para predecir la cantidad de energía requerida para cambiar un sistema de un estado de equilibrio a otro, por lo que no sirven para predecir la rapidez con que puedan producirse estos cambios. La ciencia llamada *transmisión o transferencia de calor* complementa los principios primero y segundo de la termodinámica clásica, proporcionando los métodos de análisis que pueden utilizarse para predecir la velocidad de la transmisión del calor, además de los parámetros variables durante el proceso en función del tiempo.

Para un análisis completo de la transferencia del calor es necesario considerar mecanismos fundamentales de transmisión: *conducción, convección y radiación*, además del mecanismo de *acumulación*. La energía térmica se transfiere desde el objeto de mayor al de menor temperatura, teniendo la distribución de temperatura, en cada cuerpo y de forma general, una dependencia espacial además de temporal. El análisis de la transferencia de calor es extremadamente complejo en el caso tridimensional por lo que es común simplificar su modelado considerando aproximaciones bi- o uni-dimensionales.

La transferencia de calor es, por lo general, no-adiabática⁴¹ y comprende los tres mecanismos de transmisión. Sin embargo, ante el uso de fuentes de excitación externas, como en el caso de la termografía infrarroja activa, si el flujo térmico externo es mucho mayor que el flujo entre un cuerpo y su entorno, las simplificaciones adiabáticas pueden arrojar soluciones analíticas más sencillas.

Conducción y acumulación

Siempre que existe un gradiente de temperaturas en un medio sólido, el calor fluirá desde la región con mayor temperatura a la región con menor temperatura. La *Ley de Fourier*, en el caso unidimensional, indica que la potencia calorífica que se transfiere por conducción, q_k (W), es proporcional al gradiente de temperatura y al área a través de la cual se transfiere el calor:

$$q_k = -k A \frac{dT}{dx} \quad \text{A.1}$$

donde k es la constante de proporcionalidad llamada *conductividad térmica* (W/m·K) y refleja las propiedades conductoras del material⁴²; el signo negativo indica que cuando la temperatura aumenta con la posición, el calor fluye hacia regiones de menor temperatura.

La *conductividad térmica* k es una propiedad física de cada sustancia, y puede variar ligeramente en función de la temperatura y de las características particulares del material, como puede ser el contenido de humedad de los

⁴¹ Adiabático/a: que ocurre sin que exista ningún intercambio de calor.

⁴² Obsérvese que cuanto mayor es la conductividad térmica del material, mayor será la cantidad de calor que atraviesa el sistema, para un mismo gradiente de temperatura.

materiales. Cuando el material se encuentra en equilibrio termodinámico resulta que el flujo de calor y la temperatura en cada punto del mismo permanecen constantes, y el proceso se denomina transmisión en régimen estacionario. Cuando no existe el anterior equilibrio, ya sea porque el material no ha tenido tiempo para estabilizarse o debido a que las condiciones del entorno varían en el tiempo, el proceso se denomina transmisión en régimen transitorio, caracterizado porque la temperatura en cada punto varía en el tiempo. Una consecuencia de la variación de temperatura en el interior del material es la *acumulación del calor*, debido a la propiedad de los materiales de absorber o disipar energía cuando varía su temperatura, denominada *calor específico*.

Convección

La convección es el proceso de transferencia de calor que interviene cuando entran en contacto un fluido y un sólido. El fluido puede moverse sobre la superficie impulsado por una fuerza externa en cuyo caso se trata de una convección forzada, o puede simplemente alejarse de la superficie impulsado por una diferencia de presiones, en cuyo caso se trata de la convección natural.

Tanto en la convección forzada como en la natural, actúan dos mecanismos. Suponiendo que el sólido está a mayor temperatura que el fluido, el mecanismo que se observa en la interfase entre ambos es el de conducción: las moléculas de la superficie sólida transmiten energía cinética a las moléculas del fluido que se encuentran cerca de la interfase y la transferencia de calor verifica la ecuación A.1 evaluada en la *interfase*, movimiento molecular aleatorio (difusión):

$$q_c = -k_{\text{fluido}} A \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} \quad \text{A.2}$$

El segundo mecanismo de transferencia de calor, involucra el movimiento macroscópico de fracciones de fluido cuyas moléculas “arrastran” el calor a regiones alejadas de la superficie y que se encuentran a temperaturas más bajas.

Tomando en cuenta ambos mecanismos, la potencia calorífica que se transfiere por convección es proporcional al área de contacto entre el sólido y el fluido y a la diferencia de temperaturas de la superficie T_s y la del fluido en un punto alejado de esa superficie T_∞

$$q_c = h A (T_s - T_\infty) \quad \text{A.3}$$

siendo h ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$) la constante de proporcionalidad, llamado *coeficiente de convección*. Es importante señalar que la expresión A.3 es una expresión fenomenológica que, planteada por *Newton* en 1701 (Ley de Newton del enfriamiento), se sigue usando hasta nuestros días. El valor de h depende de las condiciones en la capa límite, de la velocidad del fluido, de la forma de la superficie, de las propiedades físicas del fluido. Cualquier estudio de convección se reduce finalmente a un estudio de los medios por los que es posible determinar h .

Radiación

Se denomina transmisión de calor por *radiación* al hecho de que la superficie del material intercambia calor con el entorno mediante la absorción y emisión de energía por ondas electromagnéticas. Mientras que en la conducción y la convección es precisa la existencia de un medio material para transportar la energía, en la radiación el calor se transmite a través del vacío, o atravesando un medio transparente como el aire.

Todas las superficies opacas emiten energía en forma de radiación en una magnitud proporcional a la cuarta potencia su temperatura absoluta T , y en un rango de longitudes de onda inversamente proporcional a su temperatura absoluta. Por consiguiente, los materiales emiten radiaciones de onda larga, correspondiente al espectro infrarrojo lejano, procedente de sus superficies a temperaturas típicas del ambiente, en función de una propiedad superficial denominada *emisividad*, y de forma simultánea absorben radiaciones similares emitidas por las superficies visibles de su entorno, en un proceso denominado *irradiación*.

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad \text{A.4}$$

Sistema eléctrico equivalente para modelar el mecanismo de radiación entre dos cuerpos

Tanto la conducción como la convección en aire proporcionan flujos de calor relativamente pequeños comparándolos con el flujo del mecanismo de radiación. Hay que tener en cuenta que el aire a presión atmosférica posee una *conductividad térmica* k muy baja, de valores comprendidos entre 0.026 y 0.1 W/m.°C en el rango de temperaturas entre 0 y 1300 °C, y un *coeficiente superficial de transmisión de calor* h de entre 1 y 25 en convección natural. Estos valores junto con la “transparencia” del aire a la radiación infrarroja, hace que la mayor parte del flujo de calor que reciba un cuerpo, proveniente de otro a mayor temperatura y con el medio intermedio siendo aire, sea debido al mecanismo de radiación (observar además la dependencia lineal con la diferencia de temperaturas de los mecanismos de convección y conducción y la dependencia con la temperatura elevada a la cuarta de la radiación).

Con este planteamiento, se puede modelar la radiación entre dos cuerpos como un circuito eléctrico con los siguientes componentes [Holman, 1998].

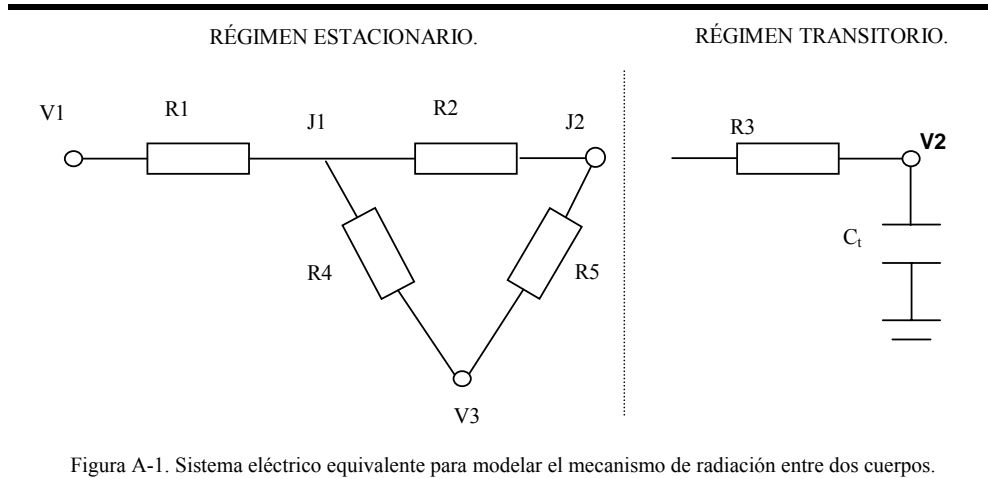


Figura A-1. Sistema eléctrico equivalente para modelar el mecanismo de radiación entre dos cuerpos.

Las tensiones V_i hacen referencia a la radiación total emitida en todas las longitudes de onda, las resistencias R_i se obtienen a partir de *los factores de forma de radiación*, las J_i son la radiación total que abandona las diferentes superficies por unidad de tiempo y por unidad de área y C_t representa una la acumulación térmica del material y que delimitará el tiempo necesario que ha de pasar antes de encontrarse en el estado estacionario. Los valores que toman cada uno de los distintos componentes de este modelo equivalente son:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} & R_3 &= \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2} \\
 R_2 &= \frac{1}{A_1 * F_{12}} & R_4 &= \frac{1}{A_1 * F_{13}} & R_5 &= \frac{1}{A_2 * F_{23}} \\
 F_{13} &= 1 - F_{12} & F_{23} &= 1 - F_{21}
 \end{aligned}
 \tag{A.5}$$

donde ε_i son las diferentes emisividades de las superficies, A_i son las áreas de dichas superficies y F_{ij} es el factor de forma entre la superficie i y la j .

En este punto, el material consume la potencia que en él incide calentándose⁴³ y se estabilizará, alcanzará el estado estacionario, cuando emita tanta potencia, función de su temperatura, como la absorbida. El material en estado estacionario puede tratarse como un cuerpo aislado ($Q_{\text{neto}}=0$). El tiempo que tarde el material en alcanzar la temperatura a la cual emita tanta potencia como absorba vendrá dado por su densidad (ρ), volumen (V) y su calor específico (c_e). Para variar la temperatura de un cuerpo un gradiente ΔT , la potencia que se necesita para lograrlo viene dada por la siguiente expresión [Salamander]:

⁴³ Joseph Black (1728-1799), quien distinguió entre la cantidad (caloría) y la intensidad (temperatura) del calor. Hasta principios del siglo XIX, los fenómenos en los que intervenía la temperatura eran explicados suponiendo una sustancia, llamada *calórico*, existente en todos los cuerpos y que fluía de los objetos calientes a los fríos. Pero, aún más, no se abandonó la idea de calórico hasta que James Prescott Joule (1818-1889) publicó un artículo definitivo en 1847 en Inglaterra, presentando el calor como una forma de energía. Como un resultado de los experimentos de Benjamin Thomson (Conde Rumford, publicados en un artículo en 1798), Julius Robert von Mayer (1814-1878) en Heilbronn, Hermann von Helmholtz (1821-1894) en Alemania y L.A. Holding (1815-1888) en Dinamarca sobre la conservación de la energía; Joule demostró que varias formas de energía pueden ser transformadas en otras.

$$W_{gen} = \rho \cdot V \cdot c_e \cdot \Delta T \text{ [W/(h}\cdot\text{m}^2)] \quad \text{A.6}$$

El tiempo de calentamiento vendrá entonces dado por el cociente entre la potencia necesaria para conseguir tal calentamiento y la energía suministrada.

Si se considerara la convección (aunque quedó despreciada por un bajo valor del coeficiente h) la temperatura de un cuerpo varía de T_0 a T_f en un tiempo t al cambiar el ambiente de T_0 a T_g . Este tiempo vendrá dado por las expresiones [Tong, 1996]:

$$\frac{T_f - T_0}{T_g - T_0} = 1 - e^{-\frac{h}{\rho_f c_f \sigma_f} t} \Rightarrow t_c = \frac{\rho_f c_f \sigma_f}{h} \quad \text{A.7}$$

Trabajando en régimen estacionario, se puede sustituir todo el circuito por una R_{eq} y un q , flujo equivalente de calor. En estas condiciones, se puede obtener la temperatura del equilibrio térmico en un objeto mediante la resolución del sistema con las siguientes ecuaciones:

$$q = \frac{V1 - V3}{R_{eq}} = \frac{V1 - J1}{R1} \Rightarrow \frac{J1 - J2}{R2} = \frac{J1 - V3}{R2 + R5} \quad \text{A.8}$$

$$R_{eq} = R1 + \frac{1}{\frac{1}{R4} + \frac{1}{R2 + R5}}$$

A partir de estas ecuaciones se pueden obtener simulaciones del sistema a estudio. Así, suponiendo una superficie circular de radio 1 cm a 1000°C y un objeto de superficie circular de radio 10 μm se pueden obtener unas curvas como las siguientes:

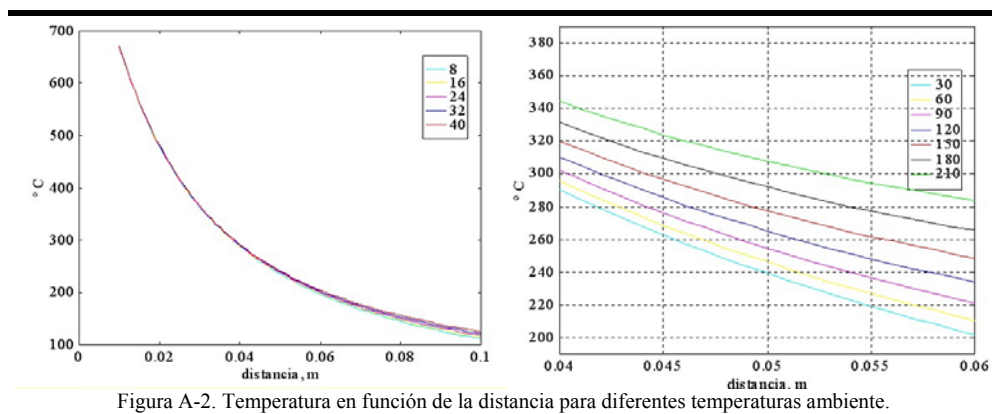


Figura A-2. Temperatura en función de la distancia para diferentes temperaturas ambiente.

En estas imágenes se puede observar la variación de la temperatura que alcanza un objeto situado a una determinada distancia según una temperatura ambiente. Básicamente, se puede concluir que hay casi una independencia con la temperatura ambiente, que al ser el área de la segunda superficie mucho menor que la de la primera también se puede aproximar el factor de forma con una cierta independencia de este radio y que hay un gran gradiente con la distancia entre las superficies.

Trabajando en vez de con placas rectangulares con placas circulares (más sencillo) y al ser la segunda superficie tan pequeña respecto a la emisora, el factor

de forma será muy pequeño. Estudiando la variación de este factor con la posición longitudinal relativa donde se encuentre, se observa que apenas tendrá influencia. En la siguiente figura se puede apreciar cómo el factor de forma es menor colocando la segunda superficie centrada en el borde de la superficie emisora que cuando está sobre ella.

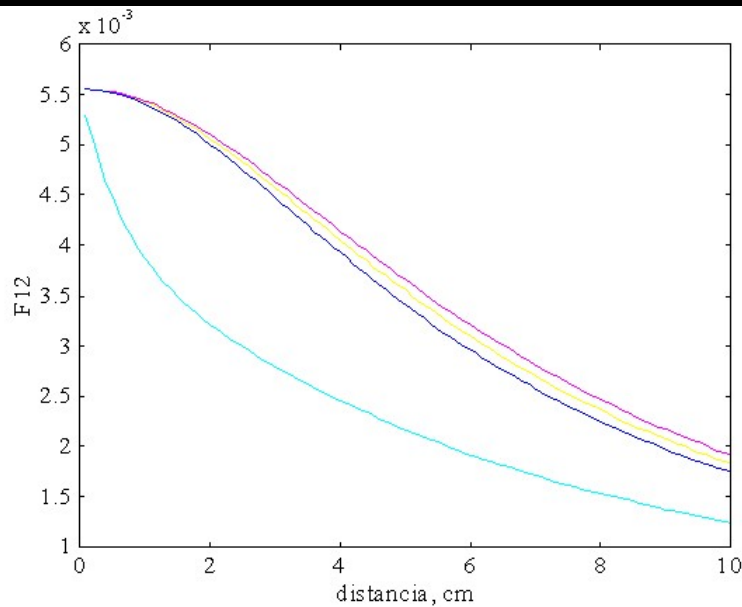


Figura A-3. [0 1] [5.5 6.5] [8.5 9.5] [4.25 5.25] Transductor centrado de 1cm^2 y superficie a t^{a} cte de 180 cm^2 .

En la siguiente figura se puede apreciar como varía la temperatura del transductor con la distancia según las diferentes posiciones longitudinales:

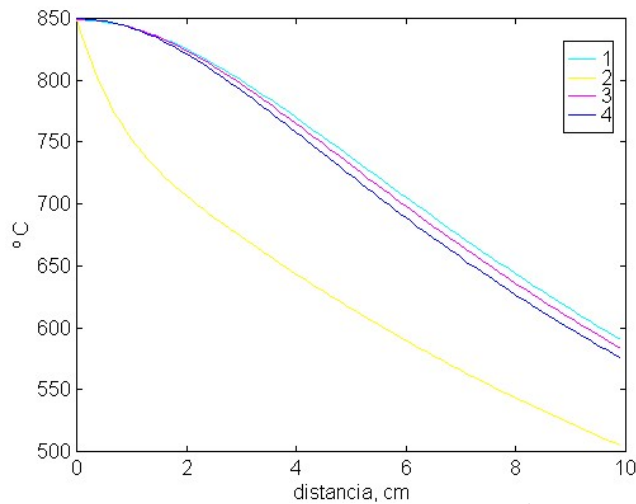


Figura A-4. [0 1] [5.5 6.5] [8.5 9.5] [4.25 5.25] Transductor centrado de 1cm^2 y superficie a t^{a} cte de 180 cm^2 .

Independencia de la potencia captada

Siempre y cuando se pueda considerar la superficie emisora como infinita respecto a la superficie receptora de la radiación térmica, la potencia captada por ésta es independiente de la distancia y del ángulo de alineamiento entre las superficies [Zur, 1992]. La distancia influye en el FOV(field of view) del

transductor y la anterior independencia sólo se produce si la superficie termalmente uniforme es mayor que el área cubierto por el FOV.

En estas condiciones, la potencia captada por una fibra será independiente de la distancia y de la inclinación que tenga respecto a la normal a la superficie de donde se quiere captar la radiación y vendrá determinada por el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 P_{in}(\theta_1, \gamma, \lambda) &= 8\pi a^2 I_\lambda \sin \theta_1 \cos \theta_1 f(\gamma, \theta_1) \\
 f(\gamma, \theta_1) &= \cos^2 \gamma \Theta \left(\frac{\sin \theta_{1c}}{\sin \theta_1} - \cos \gamma \right) \\
 \sin \theta_{1c} &= \min \left(\frac{n_{co}}{n_1} \sin \theta_c, 1 \right) \\
 \Theta &= \begin{cases} 1 & \cos \gamma \sin \theta \leq \sin \theta_c \\ 0 & \cos \gamma \sin \theta > \sin \theta_c \end{cases} \\
 \theta_c &= \cos^{-1} \left(\frac{n_{cl}}{n_{co}} \right)
 \end{aligned} \tag{A.9}$$

Así, la potencia dependerá únicamente de los parámetros de diseño de la fibra que determinarán los ángulos de incidencia máxima de la luz que podrá guiarse.

Cuerpo negro esférico

El hecho de crear una cavidad esférica de radio mayor que el de la apertura de la cavidad, hace que si se trata de una superficie difusa y con temperatura uniforme la emisividad aparente vista a través de la apertura es mayor que la propia emisividad del material que forma la cavidad. La expresión que determina esta emisividad aparente relacionando las áreas de la esfera y de la apertura es [Chandos, 1974]:

$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon}{1 - (1 - \varepsilon) \frac{1 + \cos \left(\arcsen \left(\frac{r_{aper}}{R_{bb}} \right) \right)}{2}} \tag{A.10}$$

Con ello, se consiguen emisividades muy altas, por efecto de la geometría, partiendo de materiales que no las poseen. A continuación, se puede apreciar la emisividad aparente de una cavidad de este tipo:

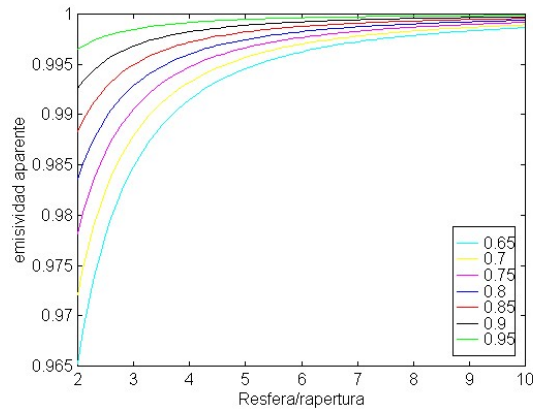


Figura A-5. Emisividad aparente de una cavidad en función de la geometría de un cuerpo negro y la emisividad real del material utilizado.

Referencias

- [Chandos, 1974] R.J. Chandos, R.E. Chandos, Radiometric Properties of Isothermal, Diffuse Wall Cavity Sources, *Applied Optics*, Vol.13, no.9, pag. 2142-2152, 1974.
- [Holman, 1998] J.P. Holman, *Transferencia de Calor*, Ed. McGrawHill, pag. 504, 1998.
- [Salamander] Salamander Ceramic Infrared Emitters Technical Manual.
- [Tong, 1996] L.Tong, Y. Shen, R. Xu, Z. Ding, Study on Frequency Response Characteristics of High-temperature Fiber Optic Sensor Head, *Fiber Optic Sensors V, Proc. Spie*, Vol.2895, pag. 431-434, 1996.
- [Zur, 1992] A.Zur, A.Katzir, Theory of noncontact point thermal sensing by fiber-optic radiometry, *Applied Optics*, Vol. 31, No. 1, pag. 55-68, 1992.

B Conocimientos y técnicas claves en termografía infrarroja

Tanto por su naturaleza como por su aplicabilidad, la TI requiere de la fusión de conocimientos y técnicas procedentes de diversos campos de la ciencia y de la tecnología. Por ello, con el fin de facilitar el seguimiento de lo recogido en esta tesis y una mejor comprensión de las aportaciones en ella incluidas, en lo que sigue se efectúan unas brevísimas “pinceladas” sobre los conocimientos y técnicas claves en TI, instando al lector a la consulta de referencias como [Maldague, 2001].

B.1 La medida termográfica

La temperatura puede ser determinada midiendo la radiación emitida por una superficie en una porción infrarroja del espectro electromagnético. Tras ser detectadas, la señal eléctrica correspondiente es entonces convenientemente procesada. Por ello, es necesario considerar tres aspectos fundamentales: la superficie del objeto, la transmisión de la radiación entre el objeto y el instrumento sensor y el propio instrumento de medida [Kaplan, 1999].

Cualquier objeto que se encuentre a una temperatura superior a una temperatura superior a *cero absoluto* (0 K o -273°C) emite energía en el espectro infrarrojo según una distribución que puede ser caracterizada por tres leyes físicas: la *ley de Planck*, la *ley Stephan-Boltzmann* y la *ley del desplazamiento de Wien* [Holst, 2000]. La primera de ellas describe la distribución de la intensidad radiada desde un emisor perfecto en función de la temperatura de éste. En la segunda de ellas, aparece el concepto, en forma de variable, de la *emisividad*⁴⁴ como una característica superficial del material que permite modelar la radiación total emitida por un cuerpo a una temperatura, la integración a todas las longitudes de onda de la ley de Planck. Finalmente, la tercera ley recoge la evolución del pico de la energía en función de la temperatura, obtenida a partir de la derivada de la función de Planck.

No todos los cuerpos emiten toda la radiación descrita por la ley de Planck sino que emiten una fracción de ésta. Esta fracción es la emisividad y, en general, varía con la longitud de onda, la forma del objeto, su temperatura, el ángulo de emisión de la radiación, las irregularidades de la superficie, factores ambientales... De esta forma se clasifica los materiales en *cuerpos negros*⁴⁵, *cuerpos grises* y *cuerpos no grises* según varía o no la emisividad de una superficie. Pero además, como consecuencia de la conservación de la energía, cuando una

⁴⁴ En 1879, Josef Stefan (1835-1893) determinó experimentalmente una expresión que relacionaba la radiación emitida por una superficie con la temperatura a la que se encontraba. En 1884, uno de sus estudiantes (Ludwig Boltzmann, 1884-1906) confirmó teóricamente sus resultados.

⁴⁵ En 1860, Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) definió un cuerpo negro (*blackbody*) como aquella superficie que ni refleja ni transmite radiación incidente. Un cuerpo negro absorbe toda radiación independientemente de su longitud de onda y su dirección de incidencia. Además, al igual que absorbe, emite radiación a toda longitud de onda y en todas las direcciones como ninguna otra superficie puede hacer.

radiación es incidente a un cuerpo, parte de ésta es transmitida, parte absorbida y parte reflejada. Existe entonces una estrecha relación con otras propiedades de las superficies de los materiales: la *transmisión*, la *absorción* y la *reflexión*. Y, si el objeto se encuentra en *equilibrio térmico* con su entorno, la cantidad de energía absorbida debe ser igual a la radiada, haciendo que la *absorción* sea igual a la *emisividad*.

Las características del medio de transmisión existente entre el cuerpo bajo inspección y el instrumento de medida también afecta a las medidas de temperatura sin contacto. No existiría pérdida de energía si la medida se realizase en el vacío pero, incluso para distancias cortas, cualquier medio puede absorber energía y, por tanto, puede perturbar la medida. Así, el rango efectivo para los sistemas de medida termográficos está limitado por los fenómenos de absorción y dispersión de la radiación electromagnética en la atmósfera siendo dependiente de la distancia, condiciones ambientales, partículas en suspensión,...⁴⁶

La radiometría infrarroja recoge las características de transmisión de los medios y materiales definiendo así el rango espectral en el que el cuerpo emite radiación, el rango espectral en el que el medio transmite y el rango espectral en el que el sensor funciona. En las medidas radiométricas, es de interés la captura de la mayor emisión posible por lo que es práctica habitual modificar la superficie del cuerpo inspeccionado añadiéndole un recubrimiento que aumente la emisividad y disminuya las variaciones de la misma, *blackpainting*, trabajar en las ventanas de menor atenuación atmosférica y utilizar materiales de alta sensibilidad en esas mismas regiones como partes integrantes del sistema de medida.

El instrumento de medida está compuesto de una parte óptica (lentes y filtros), un detector⁴⁷ que convierte la energía infrarroja en una señal eléctrica y una parte electrónica que amplifica y acondiciona la señal para su posterior conversión en valores de temperatura [Maldague, 2001]. Se hace necesario un proceso de calibración y corrección de errores. Por lo general, estos sistemas se caracterizarán por el rango de temperatura que cubren, la precisión, la repetitividad, la sensibilidad térmica, la velocidad de respuesta, la resolución espacial de la medida en el objeto y la distancia de trabajo, el rango espectral de trabajo, las condiciones ambientales en las que el instrumento es operativo y otros requerimientos de salida como las salidas digitales/analógicas de que dispone.

⁴⁶ En realidad se utilizan dos ventanas de transmisión atmosférica: la del infrarrojo medio de 3 a 5 μm , utilizada para la medida de cuerpos a alta temperatura (siguiendo la ley de Wien) o en entornos cerrados y la del infrarrojo lejano de 8 a 14 μm , preferida para inspeccionar objetos a temperatura ambiente o al aire libre.

⁴⁷ Todos los transductores infrarrojos exhiben algún cambio eléctrico en función de la energía radiante que incide en sus superficies sensibles al infrarrojo. Pueden ser cambios de impedancia, capacidad, generación de voltajes o de generación de fotones pudiendo, a la vez, responder en una banda ancha o limitada espectralmente. Principalmente existen dos tipos de detectores: *detectores térmicos* (el detector se calienta según absorbe energía) y *detectores ópticos o cuánticos* (la energía incidente excita electrones).

B.2 Modelado de la transferencia de calor

El calor es energía y, como intangible, se mide a través de sus efectos. Su transferencia (por los mecanismos de radiación, convección y conducción) provoca cambios de temperatura que pueden ser medidos. Para ello, se dispone de sensores de temperatura que pueden ser de contacto o sin contacto y, dentro de estos últimos, sensores sin contacto unidimensionales o bidimensionales (de imagen térmica) [Webster, 1999].

Dado que la transferencia del calor está condicionada por las propiedades físicas del material, se puede controlar, evaluar, analizar o inspeccionar un material a través de la medida de su temperatura. El modelado de los distintos mecanismos de transferencia de calor resulta, entonces, de primordial importancia.

Cuando se trata de cuantificar la temperatura se procede a realizar un “preanálisis” con el fin de predecir el comportamiento de la superficie bajo inspección analíticamente (para las situaciones y aproximaciones más simples) o modelando la compleja transferencia de calor por medio de técnicas de elementos finitos o diferencias finitas [Maldague, 2000]. En la actualidad se dispone de software que procura tal preanálisis (problema directo) estableciendo los límites de la efectividad del procedimiento considerando la geometría del defecto y determinando su *detectabilidad* sin necesidad de realizar un ensayo sobre los especímenes. Algunos ejemplos son: COSMOS/M, Termo, ThermoCalc⁴⁸ y Heat 3D.

Habitualmente se utilizan modelos lineales o unidimensionales para la transmisión del calor en los materiales. Ello es consecuencia de la lentitud y complejidad del procesado de las ecuaciones de la difusión del calor que tienen en cuenta un mayor número de dimensiones, esto es, consideran que alguna o las otras dos dimensiones son también finitas.

Se puede encontrar numerosa literatura básica con las ecuaciones que modelan la transmisión del calor en un material de forma compleja (3D) pero su aplicación a técnicas no destructivas no está desarrollada debido a los tiempos que su procesado conlleva. El uso de modelos más complejos de forma eficiente (en cuanto a tiempos de procesado), permitiría mayor exactitud de los resultados obtenidos en la actualidad, aplicando las técnicas termográficas existentes, así como subsanar las dificultades que ahora se encuentran en la aplicación de estas técnicas a determinados especímenes, esto es, ocultación entre defectos,

⁴⁸ Desde 1989, el IR Thermography Laboratory de Tomsk Polytechnic University, Rusia, ha estado desarrollando avanzados algoritmos y programas en el campo de los ensayos no destructivos con termografía. Hoy en día, ofrece programas, disponibles para Windows 98/2000/NT/XP, tales como Multilayer 1D, ThermoCalc 2D o ThermoCalc-3D. Multilayer 1D modela en una dimensión la distribución en temperatura de medios multicapa ofreciendo perfiles de la temperatura en función de la profundidad y evoluciones temporales. ThermoCalc-2D modela defectos subsuperficiales en 2D para una muestra de máximo 3 capas con forma de disco. La muestra puede ser excitada por pulsos cuadrados, de coseno alzado o impulsos de Dirac. ThermoCalc-6L (ThermoCalc-3D Pro) – modela numéricamente en 3D defectos subsuperficiales en sólidos multicapa de formas rectangulares. Como novedad, la excitación puede ser arbitraria permitiendo patrones de calentamiento no uniformes. Analiza fenómenos de difusión del calor en 3D, modela variaciones de emisividad o absorción y simula fenómenos de convección forzada.

resolución de espesores de defectos, avances en la detección de defectos en zonas próximas a aristas o contornos. También se lograría un mayor control y rigor de la simulación de la transmisión del calor en materiales compuestos (laminados, granulados, heterogéneos,...). Una mayor complejidad en el modelado supone una mejora si los tiempos de procesado de los nuevos modelos no son demasiado altos, permitiendo obtener resultados, como la caracterización de los defectos, que hasta la fecha sólo se logran mediante el uso de otras técnicas complementarias.

Por otra parte, una vez que se dispone de los ensayos adecuados, las anomalías se caracterizan de forma cuantitativa a través de “problemas inversos” con familias de curvas o ecuaciones empíricas establecidas a partir del modelado directo.

B.3 Termografía activa y pasiva

En la inspección térmica, los objetos bajo inspección pueden ser clasificados como activos o pasivos. Los cuerpos que generan por sí mismos calor o un flujo del mismo sin la aplicación o eliminación de una fuente externa se consideran activos. Por el contrario, aquellos que requieren de un aporte o extracción de calor externo para establecer un flujo hacia o desde el objeto son considerados pasivos térmicamente. En la evaluación de tales especímenes, la sincronización y control temporal de la inspección son críticos pues podría alcanzarse el equilibrio térmico sin que las anomalías lleguen a mostrarse. Igualmente hay que tener la precaución de evitar producir daños por estrés térmico en las piezas durante la excitación externa.

En virtud de lo anterior, la termografía infrarroja (TI) puede ser activa o pasiva. La última recoge aquellos casos en los que no se usa ninguna estimulación de calentamiento o enfriamiento externo para provocar un flujo de calor en el cuerpo inspeccionado. Sin embargo la TI activa utiliza estímulos externos para inducir un contraste térmico relevante en el objeto bajo inspección.

En la termografía pasiva, los materiales y estructuras bajo inspección se encuentran a temperaturas diferentes a la del ambiente, mostrando un patrón de temperaturas típico por el hecho de estar involucrados en procesos que producen calor. Una diferencia respecto a la temperatura normal de trabajo (referencia) del objeto sugiere un comportamiento anormal del mismo. Ello es debido al principio de conservación de la energía, la primera ley de la termodinámica, donde se recoge que cualquier proceso consume energía liberando calor según la *ley de la entropía*.

La TI pasiva captura información de temperatura en tiempo real desde una distancia segura sin ninguna interacción con el objeto. La clave reside en la diferencia de temperatura con respecto al entorno, de lo que se pueden obtener evidencias cualitativas del estado de un objeto (el análisis cuantitativo requiere de modelados térmicos de los objetos). Así, por ejemplo, se monitoriza edificaciones (localización de pérdidas de calor y humedades) o se emplea en mantenimiento preventivo, electrónica, medicina y veterinaria, elaboración de

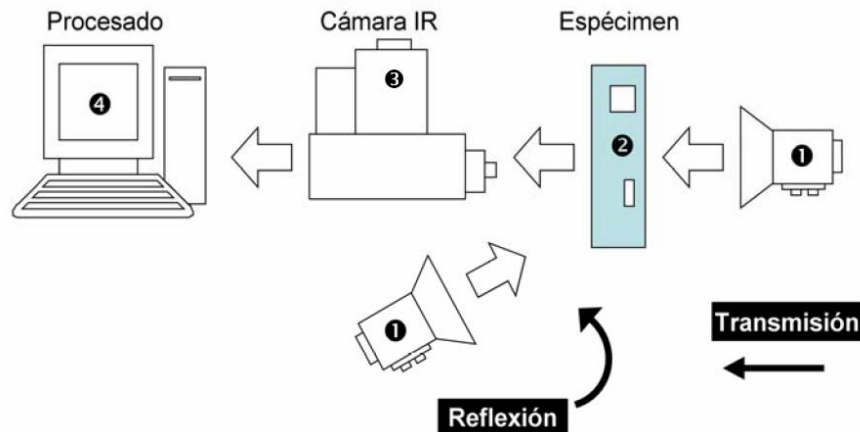


Figura B.3-1 Sistema de adquisición de imágenes por Termografía Infrarroja activa. La posición de la fuente de calor ❶ con respecto a la cámara infrarroja ❸ y el espécimen es lo que establece si la adquisición se produce en reflexión o en transmisión. La energía es transmitida por conducción al interior de la pieza ❷. La presencia de un defecto produce un aumento o disminución de temperatura de forma local en las imágenes. Éstas son procesadas, analizadas y almacenadas de forma digital ❹.

componentes y procesos industriales, detección de fuegos, fugas o detección de objetivos (militar).

En la termografía activa, a través de la estimulación externa, se provoca un flujo de calor interno en el objeto bajo estudio, permitiendo evaluar especies a temperatura ambiente. El termograma obtenido presenta un patrón térmico que posibilita una caracterización cuantitativa del interior del espécimen. Así pueden detectarse laminaciones o inclusiones (las cuales representan variaciones en la conducción interna de calor), corrosiones, fisuras, descolados de materiales o estimar propiedades térmicas de materiales, o estudiar daños por impactos, entre otras aplicaciones.

Por su importancia en END, en la Figura B.3-1 se ilustra el proceso de adquisición de imágenes por TI activa mediante un ejemplo de inspección de defectos internos en un objeto. Primero, se produce un contraste térmico en la superficie de la muestra bajo inspección ❶. En general, este contraste se obtiene 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 ondas periódicas), dependiendo de la aplicación. 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).

Las condiciones en las que se encuentre la superficie del objeto bajo inspección son muy importantes. Las medidas pueden ser influenciadas por variaciones en la rugosidad, deposición de otros materiales o la no uniformidad de la misma; es por ello que debe limpiarse y acondicionarse adecuadamente con anterioridad al test.

Una vez que el calor entra en contacto con la superficie del espécimen, la energía se transmite por conducción al interior de la pieza². 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 una inhomogeneidad con propiedades térmicas diferentes (defecto). Ello provoca una atenuación o un incremento (dependiendo de las propiedades térmicas del material y del defecto) en la conducción de calor, teniendo una relación directa con el tiempo de propagación del frente. En la superficie de la muestra surgen entonces gradientes de temperatura que pueden sugerir la presencia de defectos y que pueden ser detectados con la ayuda de una cámara infrarroja³. Las imágenes son finalmente adquiridas, procesadas, analizadas y almacenadas de forma digital⁴.

B.4 Preprocesado de imágenes en termografía infrarroja

Existe un gran número de fuentes de degradación de la señal infrarroja, tales como: ruido ligado al equipo de 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... [Maldague, 2001]. Así, una vez que las imágenes han sido adquiridas, diferentes técnicas de tratamiento pueden ser utilizadas para realzar el contraste, detectar la presencia de defectos y caracterizarlos.

Ambos esquemas de termografía infrarroja, pasiva y activa, requieren de un importante procesamiento de sus imágenes. La precisión y exactitud en la medida de temperaturas debe estar garantizada y es por ello que existe una algorítmica con la que se pretenden minimizar los efectos del ruido del sistema, de la óptica y la electrónica que capturan los valores de temperatura [Maldague, 2001]. La primera etapa de preprocesado consiste en adecuar y regenerar los píxeles defectuosos (badpixels o píxeles muertos), esto es, píxeles que presentan niveles anormales de intensidad. El siguiente paso es la corrección del patrón de ruido fijo (FPN-Fixed Pattern Noise) causado por diferencias en la responsividad de los detectores. El encuadre (vignetting) consiste en un oscurecimiento de las esquinas de los termogramas respecto al centro de los mismos debido a una exposición limitada en esas áreas. El procedimiento de corrección de encuadre requiere una etapa de calibración que involucra la toma de termogramas de cuerpo negro a diferentes temperaturas (en el rango de operación). Finalmente, los datos obtenidos por la cámara y que recogen valores de intensidad de la radiación infrarroja han de ser transformados en valores de temperatura. Para ello, se requiere una calibración en temperatura, ver anexo D.1.

B.5 Excitaciones ópticas en termografía infrarroja activa - Orientación conceptual

Cuando una superficie es calentada, se generan ondas dispersivas que se atenúan rápidamente en la región contigua a la superficie. Estas ondas, conocidas como *ondas térmicas*, fueron investigadas por primera vez por el matemático francés Jean Baptiste Joseph **Fourier** (1768-1830) y son de gran importancia para la

explicación de los fenómenos fototérmicos y fotoacústicos, base de numerosas técnicas no destructivas de ensayos.

Muchos autores han contribuido a un número elevado de técnicas y algoritmos que modelan el proceso de transferencia de calor a través de la conducción ante varios tipos de excitación. Desde las aproximaciones más básicas unidimensionales (1D) hasta modelados tridimensionales (3D), el proceso ha sido siempre condicionado a un conocimiento a priori del espécimen. Bien las dimensiones del cuerpo (poder suponer semi-infinitud en alguna de sus dimensiones), los coeficientes térmicos (conductividad térmica, densidad, calor específico, difusividad térmica, longitud de onda térmica,...), bien una aproximación de la estructura interior del material (si es un medio multicapa, su composición); todo conocimiento a priori es útil para un mejor (o más simplificado) modelado de las ecuaciones de conducción del calor.

Teniendo bajo control el modelado del proceso de conducción del calor tras una determinada excitación superficial, la temperatura que se observe en la superficie estará íntimamente relacionada con lo que ocurre en el interior del material y, a su vez y de forma inversa, conocida la temperatura en la superficie podremos interpretar lo que pueda pasar en el interior. En condiciones de homogeneidad tanto del material como de la excitación térmica producida, la temperatura superficial debe ser igual en toda la superficie y cualquier variación es interpretada como una alteración de las condiciones de conducción de la onda térmica hacia el interior del material, condiciones que a partir del modelado podremos catalogar.

En este punto, dado que el uso de la termografía infrarroja como sistema de detección nos permite el *mapeado* remoto (sin contacto) y preciso de la temperatura de una superficie, se pueden detectar y evaluar defectos, imperfecciones y cambios de composición en el interior de materiales de una forma rápida, fiable y segura. La cámara o sistema de detección infrarroja detectará únicamente la radiación emitida por la superficie pero, en virtud de lo anteriormente comentado, la radiación portará información igualmente del interior.

B.6 Tipos de excitación

La excitación externa a la que puede ser sometido un espécimen y que termina produciendo en él un frente de ondas térmico (energía térmica) puede tener diferentes orígenes, tantos orígenes como formas de energía se conocen: cinética, potencial, mecánica, química, eléctrica, radiante o atómica. Sin embargo, por usos prácticos, hay que tener en cuenta la eficiencia de la conversión de cada tipo de energía a energía térmica (la que resulta de nuestro interés en este documento), reduciendo el número de posibles excitaciones. Si además se pretende que la excitación externa a implementar tenga carácter de *remoto*, esto es, sea sin

contacto, los tipos de energía que serían apropiados para una excitación eficiente quedan reducidos a la radiante y atómica⁴⁹.

Ante la mayor simplicidad y seguridad en el manejo de los equipos implicados, las formas de excitación externa más comunes se centran en el uso de energía radiante (aquella existente en un medio físico, causada por ondas electromagnéticas y mediante las cuales se propaga directamente sin desplazamiento de la materia) y más concretamente en rangos de longitudes de onda donde las radiaciones no tienen suficiente energía como para romper enlaces atómicos (radiación no ionizante). Se tiene, por lo tanto, todo un espectro de radiaciones desde el ultravioleta hasta las ondas de radio que pueden dar lugar a una transferencia de energía en forma de calor hacia el material si la absorción es eficiente. Aunque minoritariamente existen técnicas que usan microondas para el calentamiento de los especímenes [Cuccurullo, 2002], la forma más popular de excitación térmica para la realización de ensayos no destructivos hace uso del efecto fototérmico, mencionado anteriormente.

Otro factor importante, a la hora de establecer la excitación externa necesaria para generar un frente térmico en el material bajo inspección, es el determinar la duración de la misma. Así, se puede liberar o transferir la misma energía de forma pulsada (de mayor o menor temporalidad) o de forma modulada. Esto da lugar, en el caso de la termografía activa, a la termografía pulsada (*pulsed thermography*), la termografía de pulso largo (*long-pulse* o *step-heating thermography*) y la termografía de lazo cerrado (*lock-in thermography*). En los siguientes apartados se hará una introducción a cada una de estas excitaciones.

Como casos particulares, en lugar de realizar un calentamiento mediante lámparas de luz modulada se pueden utilizar otros sistemas de excitación térmica o mezcla entre ellos. Si se usa una conversión directa de energía mecánica a energía térmica, enfatizando la liberación de calor por fricción, una vibración mecánica inducida externamente como excitación (por ejemplo aumentando o disminuyendo la frecuencia de la excitación mecánica a través de un transductor piezoeléctrico) hace que aparezcan y desaparezcan gradientes locales de temperatura, se hablaría entonces de vibrotermografía o TI lock-in ultrasónica⁵⁰. Otra variación es la TI lock-in termoinductiva que excita corrientes de Eddy en materiales conductores mediante una bobina de inducción.

Termografía de lazo cerrado⁵¹

La termografía de lazo cerrado o termografía modulada, más conocida como lock-in thermography, está basada en la generación de ondas térmicas en

⁴⁹ Existe también la posibilidad de usar pistolas de aire caliente o de frío para la excitación remota de un frente térmico en materiales. Sin embargo, en estos casos, se trataría de una transferencia de calor a través del mecanismo de la convección sin conversión entre diferentes tipos de energías.

⁵⁰ Puede conseguirse una variación de la termografía lock-in ultrasónica utilizando un pulso ultrasónico en vez de una excitación continua. Esta técnica es denominada Ultrasound Burst Phase Thermography.

⁵¹ Otros términos comunes, en inglés, que designan esta técnica y pueden ser encontrados en la literatura son, entre otros: *Modulated Thermography*, *Phase Angle Thermography* y *Photothermal Thermography* o *Radiometry*.

régimen permanente en el interior de la muestra bajo estudio. Fue descrita por primera vez por Carlomagno y Berardi [Carlomagno, 1976] y posteriormente desarrollada por muchos otros autores.

Se trata de un método de medida dinámico donde la excitación externa es generada en forma de una función sinusoidal mediante lámparas halógenas, láseres o pistolas de aire caliente. La onda térmica que aparece en la superficie del material se propaga hacia el interior y es reflejada cuando alcanza partes donde los parámetros de transferencia de calor cambian (inhomogeneidades). La onda reflejada interfiere con la onda superficial dando lugar a un patrón de interferencia oscilatorio que puede ser medido en términos de amplitud y fase. Intuitivamente, la posibilidad de “visualizar” defectos en un material depende de la diferencia en las propiedades térmicas del material y de las inhomogeneidades. Si la diferencia es demasiado pequeña, el contraste de las imágenes que obtengamos no va a ser bueno y peor conforme el defecto esté a mayor profundidad a causa de la difusión térmica en el material. No siempre la limitación es ésta, si se inspeccionan materiales con una gran conductividad térmica la propagación de las ondas térmicas se produce tan rápidamente que el contraste será pequeño.

A la serie de imágenes capturadas se le aplica la transformación de Fourier, obteniéndose los datos de la evolución en fase y amplitud de la temperatura. La amplitud y la fase de la respuesta, también sinusoidal, dependen fuertemente de la frecuencia de la excitación. Es un buen indicativo de la sensibilidad de esta técnica pero a su vez representa una de las limitaciones más fuertes de su aplicación. Por ejemplo, en el caso de un sólido semi-infinito sometido a una variación periódica de su temperatura superficial de frecuencia w , el estudio matemático se vuelve unidimensional y la amplitud de la variación de la temperatura resultante disminuye exponencialmente a medida que penetra en el sólido a razón $z\sqrt{w/2\alpha}$ donde z es la profundidad y α la difusividad térmica del material. Esto indica que, a mayor frecuencia, mayor atenuación sufre la onda térmica y por lo tanto se restringe el análisis a una región más cercana a la superficie. El rango de profundidades ha sido estimado en μ , la longitud de difusión térmica, para las imágenes de amplitud y en 1.8μ para las imágenes de fase [Busse, 1979].

El caso de estudio de la transferencia de calor en un sólido semi-infinito es el más sencillo al simplificar las ecuaciones de su modelado. La solución para una onda térmica sinusoidal periódica propagándose a través de un material homogéneo y semi-infinito puede expresarse como [Sigalés, 2003]:

$$T(z, t) = T_0 \exp\left(\frac{-z}{\mu}\right) \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} - wt\right) \quad \text{B.1}$$

donde T_0 en $^{\circ}\text{K}$ es el gradiente de temperatura inicial inducido por la fuente de calor, w [rad/sg] es la frecuencia de modulación, λ [m] es la longitud de onda y μ [m] la longitud de difusión térmica.

Se observa que el análisis es realizado únicamente a la frecuencia de la excitación y en una situación estabilizada (régimen permanente o estacionario). Se trata por lo tanto del análisis de un acoplo coherente de ondas. La terminología *lock-in* viene referida a esa necesidad de controlar la dependencia en el tiempo entre la temperatura registrada con el sistema termográfico como señal de salida y la señal de referencia o entrada que alimenta los equipos de la excitación. Así, es necesaria, por lo menos, la medida de un ciclo entero de excitación para poder eliminar precisamente ese patrón sinusoidal de la colección de imágenes capturadas.

En resumen, las grandes problemáticas de la tecnología de la termografía de lazo cerrado son que requiere como mínimo la observación de un ciclo de modulación y que cada ensayo es realizado para una frecuencia estudiando una profundidad cada vez, lo que aumenta el tiempo de inspección. En el análisis de un espécimen, varias experiencias deben realizarse para cubrir todo el espesor del mismo. Así, se suele empezar con un primer test cubriendo los defectos a menor profundidad con una alta frecuencia y, progresivamente, se reduce dicha frecuencia hasta que todo el espesor ha sido barrido o se alcance la mínima frecuencia disponible en el equipo. Constantemente es necesaria una solución de compromiso ya que para inspecciones más profundas serán necesarias frecuencias más bajas y por lo tanto mayores tiempos de ciclo. Sin embargo, su gran resolución térmica al reducir el ruido en la imágenes (característica de los sistemas *lock-in*), la posibilidad de ajuste en función del material y la ayuda de poder realizar variaciones de frecuencia suficientes como para “barrer” cada profundidad permiten utilizar esta técnica para la realización de *tomografías térmicas*.

Termografía pulsada⁵²

Basada en pulsos de energía luminosa, la excitación térmica por termografía pulsada se ha convertido en la herramienta más común y conocida de las técnicas de ensayos no destructivos basados en termografía. La duración del pulso (en el rango de los milisegundos) está indicada para la inspección de materiales con una alta conductividad térmica, previene de provocar daños a los componentes y contribuye a que el proceso de inspección pueda ser considerado rápido. Potentes flashes, utilizados igualmente en fotografía profesional, generan incrementos térmicos de unas decenas de grados como máximo en la superficie de los materiales, valores más que suficientes para que pueda percibirse durante un tiempo la conducción del calor en el material y la reflexión (si hubiera) de las ondas térmicas ante la presencia de discontinuidades en el material. La temperatura del material cambia rápidamente según el frente térmico aplicado se propaga por difusión bajo la superficie y también a causa de las pérdidas por convección y radiación. La presencia de un defecto reduce el ratio de difusión produciendo un contraste en la temperatura superficial sobre ese punto una vez que el frente térmico le alcanza. De esta manera, el contraste de defectos más

⁵² Su terminología inglesa aparece igualmente recogida en la literatura como: Pulsed Video Thermography (PVT), Transient Thermography, Flash Thermography, Pulse-Echo Thermography and Thermal Wave Imaging.

profundos aparecerá más tarde y con menor diferencia de temperaturas. De hecho, el tiempo al que se observa el contraste es proporcional, en primera aproximación, al cuadrado de la profundidad.

Matemáticamente un pulso puede ser descompuesto en componentes sinusoidales (principio de superposición en el que una onda puede ser aproximada por la suma de múltiples armónicos de diferente frecuencia; series de Fourier). Así, la excitación térmica de la superficie de un material mediante un pulso es como si se excitara simultáneamente con numerosas ondas térmicas de diferente frecuencia. Esto invita a pensar en los beneficios de esta tecnología frente a la termografía de lazo cerrado vista anteriormente. Más allá, sólo idealmente, una delta de Dirac correspondería con un límite, el de un pulso cuya duración tiende a cero y que en el dominio espectral correspondería a la emisión en todas las frecuencias posibles. Esta última faceta es explotada por la *Termografía Pulsada de Fase (Pulsed Phase Thermography (PPT))*, una de las técnicas de análisis de datos termográficos más conocidas.

De nuevo, considerando el caso de estudio de la transferencia de calor en un sólido semi-infinito como el más sencillo al simplificar las ecuaciones de su modelado, la solución para una onda térmica pulsada propagándose a través de un material homogéneo y semi-infinito puede expresarse como [Carslaw, 1986]:

$$T(z,t) = T_0 + \frac{Q}{\sqrt{k\rho c_p \pi t}} \exp\left(\frac{-z^2}{4\alpha t}\right) \quad \text{B.2}$$

donde T_0 en °K es el gradiente de temperatura inicial inducido por la fuente de calor, Q (J/m²) es la energía absorbida por la superficie, k [W/m°K] la conductividad térmica, ρ [kg/m³] la densidad del material, c_p [J/kg°K] el calor específico y donde $\alpha = k/(\rho \cdot c_p)$ [m²/sg] es la difusividad térmica.

En este caso se observa que el análisis se realiza en un estado transitorio. Es por lo tanto de vital importancia la velocidad en la captura de los mapas térmicos y el detalle de cómo debe ser la secuencia capturada para evitar en la medida de lo posible la pérdida de información. De hecho, las capturas deben recoger una *imagen fría* que es aquella en la que el contraste térmico producido aún no ha alcanzado la superficie de la muestra bajo inspección y que resulta de interés al permitir eliminar reflexiones espurias debidas a variaciones de emisividad. En los instantes inmediatos y posteriores a la entrada en contacto del frente de excitación con la superficie del material será posible la detección de imperfecciones en el interior del material según el frente térmico se propague y difunda por el mismo.

Termografía de pulso largo

Al igual que en el caso de la termografía pulsada, la termografía de pulso largo o *step-heating* analiza la transferencia de calor en un sólido en su estado transitorio. Durante varios segundos se excita la superficie de un material de forma constante con una fuente de calor (o frío) y se observa la evolución de la temperatura superficial. Pasado el tiempo de duración del pulso (mucho mayor

que en el caso de la termografía pulsada comúnmente utilizada), el enfriamiento del material también es recogido.

Para comparar las diferentes termografías, la formulación de transferencia de calor, considerando el caso de estudio de un sólido semi-infinito, puede expresarse en este caso como [Almond, 1996]:

$$T(t) = F(t) - \delta(t)F(t - \tau)$$

$$F(t) = \frac{2Q}{k} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}} \quad \text{B.3}$$

donde $F(t)$ corresponde a la respuesta térmica debida a una excitación continua plana de la superficie y k , Q y α denotan de nuevo la conductividad térmica, la energía absorbida por la superficie y la difusividad térmica como en la ecuación B.2.

De la ecuación anterior puede extraerse que la diferencia entre las excitaciones con pulsos largos o cortos (aquellos con una duración del orden de milisegundos usados en termografía pulsada o *flash thermography*) no sólo reside en cómo la cantidad de energía es liberada (instantáneamente o distribuida de alguna forma en un tiempo mayor) sino que además reside en las diferentes condiciones de contorno que ocurren en los procesos de calentamiento y enfriamiento. Usando un frente térmico de calor, se puede lograr con ambos métodos un calentamiento superficial de similares características pero, sin embargo, en el instante en el que el enfriamiento empieza, la distribución de las temperaturas en el interior del material es muy diferente. Mientras para la termografía pulsada el resto del espécimen permanece a una temperatura inicial uniforme, en la termografía de pulso largo ya existe un gradiente cuando el enfriamiento o cese de excitación se produce. Estas condiciones cambian totalmente el modelado de tales experiencias y, en consecuencia, el análisis del material.

B.7 Referencias

- [Almond, 1996] D.P. Almond, P.M. Patel, *Photothermal Science and Techniques*, Chapman & Hall, 1ª edición, 241 páginas, 1996.
- [Busse, 1979] G. Busse, Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal, *Appl. Phys. Lett.* 35 (1979) 759–760.
- [Carlomagno, 1976] G.M. Carlomagno, P.G. Berardi, in: C. Warren (Ed.), *Unsteady Thermotopography in Non-Destructive Testing, Proceedings of the III Infrared Information Exchange*, St. Louis, 1976, pp. 33–40.
- [Carslaw, 1986] H.S. Carslaw and J.C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd edition, Oxford University Press, Oxford, 510 páginas, 1986.
- [Cuccurullo, 2002] G. Cuccurullo, P. G. Berardi, R. Carfagna and V. Pierro IR temperature measurements in microwave heating, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 43, Issues 3-5, pag. 145-150, 2002.
- [Dillenz, 2000] A. Dillenz, D. Wu, K. Breitrück, and G. Busse, Lock-in thermography for depth resolved defect characterisation, *Proceedings of the 15th World Conference on Non-Destructive Testing in Rome*, 2000.
- [Holst, 2000] G.C. Holst, *Common sense approach to thermal imaging*, Copublicado por JCD Publishing y SPIE- The International Society for Optical Engineering, 377 páginas, 2000.

-
- [Kaplan, 1999] H. Kaplan, *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment*, Segunda Edición, Tutorial Texts in Optical Engineering, SPIE PRESS, Vol. TT34, 164 páginas, 1999.
- [Maldague, 2000] X. Maldague, Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation, *Trends in optical non-destructive testing and inspection*, editors P. Rastogi y D. Inaudi, Elsevier, páginas 591-609, 2000.
- [Maldague, 2001] X.P.V. Maldague, *Theory and Practice of Infrared Technology For Nondestructive Testing*, Ed. John Wiley & Sons, New York, 684 páginas, 2001
- [Sigalés, 2003] B. Sigalés, *Transferencia de Calor Técnica*, Vol 1. Editorial Reverté, Barcelona, 926 páginas, 2003.
- [Webster, 1999] Varios autores, *Temperature Measurement, Mechanical Variables Measurement – Thermal*, editor J.G. Webster, *The measurement, instrumentation and sensors handbook*, Copublicado por CRC Press LLC y Springer-Verlag GmbH & Co. KG, USA, 1999

C Aplicaciones industriales de la termografía infrarroja en las que el autor ha colaborado

La cada vez mayor calidad de los productos solicitada por los consumidores a los fabricantes de los mismos y la estandarización, definición y certificación de la misma en función de unas normas, conduce a un mayor control de las tareas de producción. Para lograr que los productos fabricados tengan el menor número de defectos, o que estén libres de ellos, y que, conjuntamente, la productividad sea la más elevada posible, resulta estrictamente necesario el control adecuado de todas y cada una de las fases del proceso de producción. Para ello es necesario el control optimizado de todos los parámetros que intervienen en los mencionados procesos de producción y, siempre que sea posible, establecer “estructuras inteligentes” o estructuras que tienen capacidades integradas de sensorización, de toma de decisión y, a partir de ella, de actuación.

En este anexo se presentan las contribuciones más relevantes obtenidas como consecuencia de los trabajos desarrollados en proyectos en entornos industriales en los que el autor ha intervenido. Cada una de las diferentes aplicaciones involucra la adecuación y fusión de los conocimientos tanto del proceso como de la inspección termográfica en sí misma.

C.1 Proyecto SOTEPAC⁵³

La medida de temperatura en la fabricación del acero resulta de gran importancia ya que, cualquiera que sea el proceso de obtención de la colada, materia prima del proceso de fabricación del acero, horno eléctrico de arco o convertidor, su paso a estado sólido se realiza a través de lo que se denomina máquina de colada continua, ver Figura C.1-1. En este tipo de instalaciones, el acero líquido



Figura C.1-1. Vista general de la máquina de colada continua.

⁵³ PROYECTO: “Sensor de fibra Óptica multipunto para el monitorizado de altas TEMperaturas en procesos de Producción de barras de Acero en máquinas de colada Continua” (SOTEPAC).

depositado en un recipiente cubierto de material refractario denominado “cuchara”, se encuentra sometido a una temperatura entre 1550°C y 1620°C. Durante el proceso, el acero va solidificando y adquiriendo la forma requerida para una posterior transformación, comúnmente llamadas *palanquillas*. Así pues, hay máquinas de colada continua que fabrican secciones cuadradas (entre 100 y 180 mm de lado), secciones redondas y secciones rectangulares. Las dimensiones dependen del producto final.

Motivación

En todos los casos, el acero líquido es enfriado a través de unos moldes de cobre que le confieren su forma final y posteriormente a través de agua a presión que incide en su superficie. El paso del acero líquido a sólido debe verificarse de una forma controlada. Su velocidad de enfriamiento es decisiva a la hora de obtener una estructura metalográfica adecuada, un análisis homogéneo en toda la masa, y un estado superficial en el que aparezcan grietas u otros defectos ocasionados por enfriamientos no controlados, así como una degradación de las características del acero resultante.

Este control de la solidificación y el enfriamiento posterior es necesario en todos los aceros, pero hay algunas gamas en las que es más crítico (aquellos aceros con porcentaje de carbono superior a 0,75%). En la velocidad de enfriamiento influyen fundamentalmente tres factores:

- Temperatura del acero líquido - lógicamente cuanto más alta sea la temperatura del acero líquido, más tardará en enfriarse.
- La cantidad de agua de refrigeración que se utilice tanto en el molde de cobre como en las zonas posteriores.
- La velocidad de extracción de las barras o “palanquillas” o productos de colada continua.

De estos factores el primero, una vez que el acero está elaborado en la cuchara, es prácticamente imposible de variar, por lo que se “riega” con una cantidad de agua estimada “a priori” manteniendo una velocidad de extracción determinada. Esta última, por imperativos de productividad, debe mantenerse dentro de unos límites que eviten las paradas de la planta. La cantidad de agua influye así decisivamente en el proceso de enfriamiento y, consiguientemente, en el resultado final del producto por lo que sería muy deseable correlacionarla con el resto de los parámetros que intervienen en el proceso global de enfriamiento.

La temperatura de las barras al salir de la máquina de colada continua es un parámetro a través del cual se considera que se puede efectuar una buena refrigeración y mantener una velocidad de enfriamiento adecuada que optimice tanto la calidad como la productividad. Según los expertos de este tipo de industria, si se consigue monitorizar y medir (con la fiabilidad, velocidad, exactitudes y precisiones requeridas) la temperatura en las barras en su proceso inicial de enfriamiento se logra teórico-experimentalmente deducir el enfriamiento optimizado del proceso de producción de las barras y a través de ello, de una forma inmediata, actuar sobre la cantidad de agua de refrigeración y

establecer la deseada estructura inteligente que optimiza automatizadamente el proceso de producción.

A lo largo de los años se han venido haciendo intentos de medir las mencionadas temperaturas, por medio de pirómetros puntuales, pero su falta de fiabilidad, precisión, exactitud, la corta distancia del canal de comunicación entre el transductor y la electrónica unido a un considerable coste, han motivado que en la actualidad, a lo largo y ancho del mundo en este tipo de industria siderúrgica, se esté fabricando sin ningún sistema de monitorizado en línea y en tiempo real. Desde un punto de vista industrial, los sensores de fibra óptica conllevan ventajas como consecuencia de que ofrecen una excelente sensibilidad, un buen rango dinámico, suelen ser compactos, se realizan basándose en materiales aislantes, pueden tener canales de comunicaciones muy largos y, potencialmente, pueden ofrecer un coste muy efectivo por punto de medida así como una fiabilidad adecuada. Algunas de las aplicaciones ya demostradas se centran en entornos hostiles, donde puede haber altas temperaturas, materiales corrosivos, altas interferencias electromagnéticas y posibilidades de explosiones, entre otras. En la medida de altas temperaturas, dado que el punto de fusión de la fibra óptica es alto e incluso puede ser elevado con la fabricación de fibras especiales, los sensores de fibra óptica se vislumbran como una clara alternativa para resolver las desventajas que los tradicionales presentan. El sistema sensor de fibra óptica SOTEPAC desarrollado y probado en las instalaciones de Global Steel Wire S. A. se ha vislumbrado como una de las soluciones más viables a la problemática no resuelta que se ha planteado.

Principios fundamentales del sistema sensor

La termografía o medida de la temperatura sin contacto se basa principalmente en la radiación óptica, cómo se produce y cómo interactúa con la materia. Varios trabajos se han efectuado para demostrar dispositivos que midan y conviertan esta radiación de tipo calorífico en información útil para resolver problemas como la identificación de anomalías en superficies calientes o en procesos de control de enfriamiento de superficies.

La radiación óptica entendida como una forma de energía del espectro electromagnético que puede ser caracterizada por ondas o partículas llamadas fotones. La más conocida forma de energía electromagnética es la luz visible, aunque su forma incluye las ondas de radio, rayos ultravioletas, gamma o X. Todas estas formas de energía son similares y radian de acuerdo a una teoría de ondas básica. Como es conocido, cada radiación óptica lleva asociada una energía y, consiguientemente, una radiación de frecuencia diferente, pudiéndose, por tanto, afirmarse que la energía radiada por un cuerpo depende de su temperatura y de su capacidad para radiar. A través de las radiaciones de un cuerpo negro se pueden medir temperaturas absolutas. Las principales causas de errores en la medida utilizando este principio físico son: la emisividad del objeto, que depende del material y de su superficie; desalineamientos ópticos desde el punto emisor y la cabeza sensora, y la presencia de absorción entre el objeto y el detector (incluido el canal de transmisión de la señal óptica a su punto de

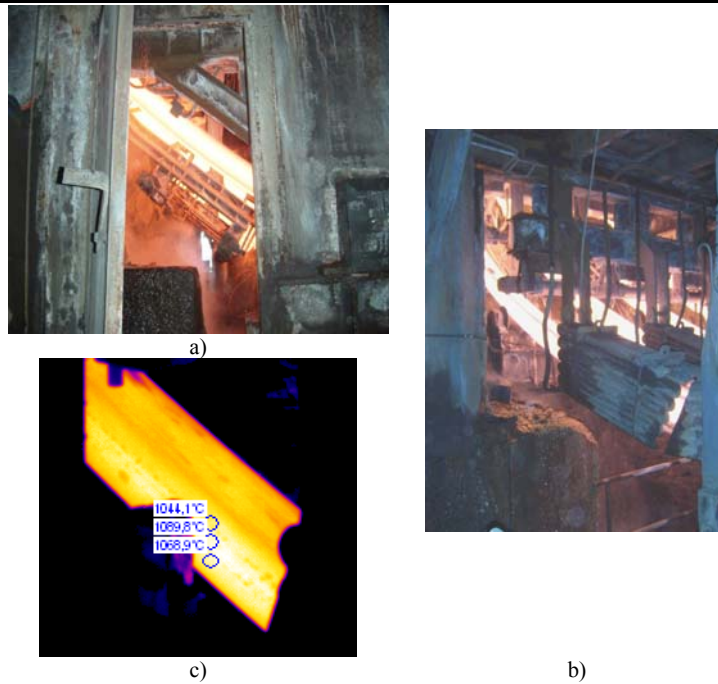


Figura C.1-2. a) Vista lateral y b) frontal de la línea de producción 6 de la acería de GWS c) Termografía donde se procesa la temperatura en tres puntos del perfil de la palanquilla.

procesado), así como la elección de los materiales adecuados para el entorno de trabajo en el que la medida se produce.

Resultados y trabajos realizados

Tras unos estudios preliminares y la definición de especificaciones para el sistema sensor se concretaron los parámetros que degradan y dificultan la medida correcta a través de otros métodos que no resolvieron la problemática siendo estos, principalmente, la absorción atmosférica, la distancia del objetivo, la variación o desconocimiento en el valor de emisividad del dispositivo y la fiabilidad del sistema en un entorno tan hostil, con altas temperaturas y alto grado de humedad. De su hostilidad da una idea gráfica la Figura C.1-2.. Las preespecificaciones técnicas inherentes al problema a solucionar se pueden resumir principalmente en:

- Rango de temperatura a medir: 850°C-1200°C
- Resolución de presentación 1°C
- Exactitud 1%
- Tiempo de muestras 2 s
- Tamaño de palanquillas 180x180 mm

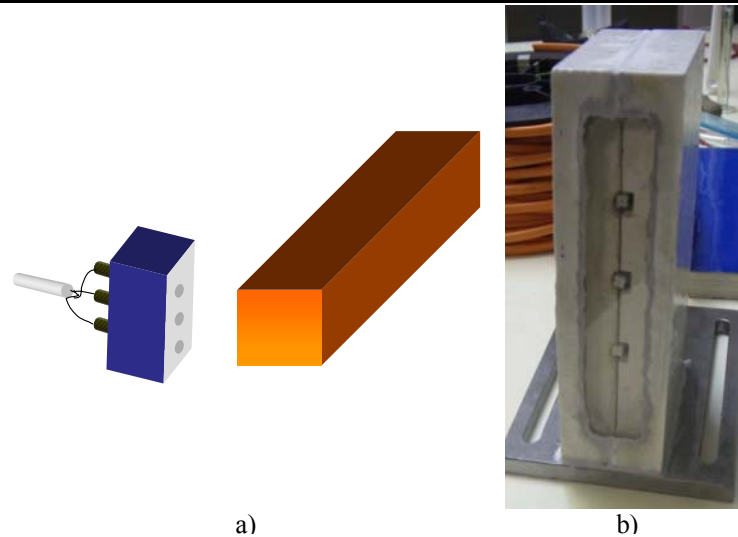


Figura C.1-3. a) Aproximación gráfica a la idea de transductor. b) Transductor real desarrollado.

Desde estas premisas se procede a construir un transductor totalmente pasivo cuyos componentes son fibras de vidrio, cerámicas, óxidos y alúminas varias preparadas para trabajar sin deterioro hasta 2000°C. Aprovechando las propiedades de inmunidad electromagnética y otras de protección que posee la fibra óptica, la información en el dominio fotónico se transporta hasta la unidad optoelectrónica situada dentro de una zona acondicionada, lejos de las condiciones hostiles de las líneas de producción y junto a los otros sistemas de control.

El diseño del transductor engloba aspectos muy variados, desde estudios sobre transferencia de calor, estudios de materiales que soporten altas temperaturas con valores de emisividad diferentes, a esmaltes protectores de humedad, además del uso de fibras ópticas especiales. Observando las severas condiciones de trabajo, del transductor, se procede a diseñarlo utilizando elementos totalmente pasivos, capaces de soportar altas temperaturas sin necesidad de refrigeración, por ser ésta una de las dificultades previas que GSW identifica y que inhabilita el uso de pirómetros comerciales. Inicialmente, el transductor mide en tres puntos extremo-centro-extremo de la palanquilla, con un aspecto como el de la Figura C.1-3, donde los puntos de color gris oscuros son los elementos transductores, convenientemente aislados entre si por un material representado por el color gris, y protegido todo por lo representado con color azul.

El transductor está constituido simplemente por fibras ópticas con sus extremos pulidos e integradas en una estructura de materiales cerámicos y hormigón para que adquieran tanto rigidez como resistencia a golpes y otros imprevistos que por su localización en la línea de producción puedan ocurrir y dañarlo. Dado que el objetivo mediante esta configuración es la captación de la radiación infrarroja emitida por el objeto que se quiere caracterizar, se consideran los factores que intervienen sobre el espectro de radiación respecto del que presenta un cuerpo negro. Se encuentra que el cuerpo emisor presenta una emisividad superficial que varía con la longitud de onda, la ventana de

transmisión del aire ante el infrarrojo cercano o las reflexiones de Fresnel en el extremo de la propia fibra óptica.

Otro de los factores que se tiene en cuenta en el diseño es la apertura numérica de la fibra que, en función de la distancia a la que se encuentre el objeto, da idea de la superficie emisora que cubre el cono de aceptación y, por tanto, de la potencia que entra en la fibra. Siempre y cuando se pueda considerar la superficie emisora como infinita respecto a la superficie receptora de la radiación térmica, la potencia captada por ésta es independiente de la distancia y del ángulo de alineamiento entre las superficies. La distancia influye en el FOV (Field of View) del transductor y la anterior independencia sólo se produce si la superficie termalmente uniforme es mayor que el área cubierto por dicho FOV. En estas condiciones, se encuentra que la potencia captada por una fibra es independiente de la distancia y de la inclinación que tenga respecto a la normal a la superficie de donde se quiere captar la radiación y que puede ser determinada matemáticamente, desde el conjunto de ecuaciones geométricas que describen este comportamiento. Así, se observa que la potencia dependerá únicamente de los parámetros de diseño de la fibra que determinarán los ángulos de incidencia máxima de la luz que podrá guiarse. Esto lleva a definir parámetros tales como diámetro de núcleo de la fibra, distancia óptima del transductor al objetivo, etc.

La dependencia de la emisividad se resuelve de dos formas: i) usando lo conocido como pirometría de dos colores, es decir usando dos zonas espectrales diferentes y midiendo la radiación en cada una de ellas para, en función de su relación, poder determinar temperatura real, ii) enviando a través de otra fibra un haz láser pulsado sobre el objetivo, de manera que se obtiene dos medidas: una cuando el láser esta emitiendo y otra cuando el láser no irradia. La correcta interrelación permite determinar la temperatura del objetivo y la emisividad del mismo [Madruga, 2001-OdimapIII].

Las difíciles condiciones de trabajo del transductor hacen necesaria su protección; i) incrustándolos en un material soporte cerámico que soporta temperaturas de trabajo superiores a 2000°C sin deterioro, ii) utilizando un cristal vitrocerámico que además de ideal para el entorno de trabajo, protege los extremos de fibra, parte muy débil del sistema, y presenta una transmisividad que no afecta a las longitudes de onda de interés para el transductor, iii) con un esmalte cerámico para proteger el transductor de acción del la humedad y el agua.

Por tanto, el transductor completo desarrollado mostrado en la Figura C.1-3b,

- Triplica el número de cabezas sensoras en un transductor de una pieza.
- Protege las cabezas tanto desde un punto de vista térmico mediante materiales ya mencionados y usados como con un material soporte, que haga el transductor robusto, ante el entorno hostil de trabajo y ante la manipulación de personal no especializado con la tecnología de fibra.

El sistema utiliza fibra óptica como canal de transmisión o comunicación entre el transductor y la unidad de procesado y, por lo tanto, trabaja en alguna de

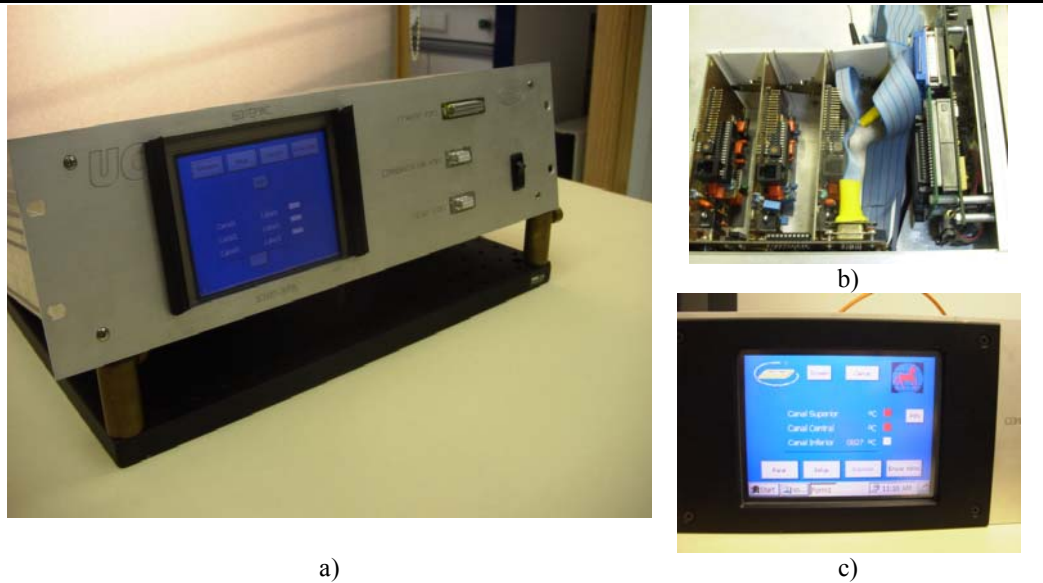


Figura C.1-4. Unidad optoelectrónica para obtener la medida de temperatura en el proyecto SOTEPAC. A) Vista general b) Vista del interior de la unidad donde se aprecian las tres placas de circuitos esclavos (una por cada transductor), conectadas a la placa que opera como maestro y que interconecta todo con el PC empotrado c) pantalla capturada del PC empotrado.

las típicas ventanas de comunicaciones ópticas (donde la atenuación de la fibra es más baja) con el fin de poder instalar la electrónica, la parte de más delicado comportamiento térmico, en zonas lo más alejadas posibles del transductor y en condiciones de temperatura y de humedad normales (e incluso en zonas de posible acondicionamiento). El sistema sensor completo desarrollado tiene un canal de fibra multimodo de aproximadamente unos 35 metros.

La unidad optoelectrónica diseñada, ha sido desarrollada y caracterizada, completamente, en el Laboratorio de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria, incluyendo sus algoritmos de compensación de errores y de todo lo concerniente al acondicionamiento, tratamiento y visualización de la información. El error máximo del sistema se sitúa en valores inferiores al 0.8 % [Madruga, 2002-ECNDT]. Los algoritmos incluyen todo lo inherente a la compensación de errores en la medida en altas temperaturas sin contacto, tales como absorción atmosférica, distancia de objetivo, variación o desconocimiento en el valor de emisividad del dispositivo, equalización de los efectos del canal aire-fibra, solapamiento del espectro emitido y responsividad de los dispositivos de detección.

La unidad optoelectrónica, que se puede observar en la Figura C.1-4, se basa en una arquitectura maestro-esclavos, donde el papel del primero es ejercido a través de un PC empotrado que gestiona:

- Toda comunicación externa e interna del equipo. Pantalla, teclado, puertos, y envío interno de datos entre placas
- El almacenamiento de los datos y la generación de históricos.

mientras que los módulos esclavos realizan la detección, acondicionamiento y procesado de los datos, además del envío de resultados al maestro cuando éste se lo pida. Esta arquitectura fue considerada la más flexible y económica ya que

permite incrementar el número de esclavos en función del número de cabezas transductoras que se quieran usar, compartiendo el maestro, la parte más cara del sistema.

Todo el procesado de datos y presentación de resultados se realiza con un microcontrolador PIC 16C876. Permite establecer de forma automática rangos de ganancia adecuados en el amplificador de detección y de esta manera otorgar con mayor precisión a la medida. La detección de luz se realiza a través de un detector tipo sándwich el cual permite realizar dos medidas simultáneas en dos rangos de longitudes de onda diferentes, cada uno de los cuales lleva su propia electrónica de detección y acondicionamiento para ser procesada mediante la técnica de pirometría de dos colores. Valores añadidos a la unidad optoelectrónica son el almacenamiento de datos para generar históricos, la comunicación externa, las facilidades de impresión de datos, la reprogramación sencilla y una interfaz "amigable" para el usuario.

Calibración en laboratorio y prueba de campo

Utilizando un soporte metálico con guías para posicionar perfectamente el transductor a varias distancias y con ángulos de inclinación diferentes se ha estudiado el comportamiento del sistema sensor a diferentes distancias además de su variación en ángulo. Numerosas pruebas fueron recogidas siendo las más relevantes las presentadas en la Figura C.1-5. La estabilidad del sistema ha sido medida en laboratorio, fijando un objeto a una temperatura de 1100°C y reproduciendo la medida del sistema durante unas 12 horas. La variación del sistema ha sido de $\pm 3^\circ\text{C}$, cometiendo un error relativo en la medida de un 0,72%. Cabe señalar que la fuente de calibración de cuerpo negro utilizada presenta una exactitud de 3°C y una variación de 1°C cada 8 horas.

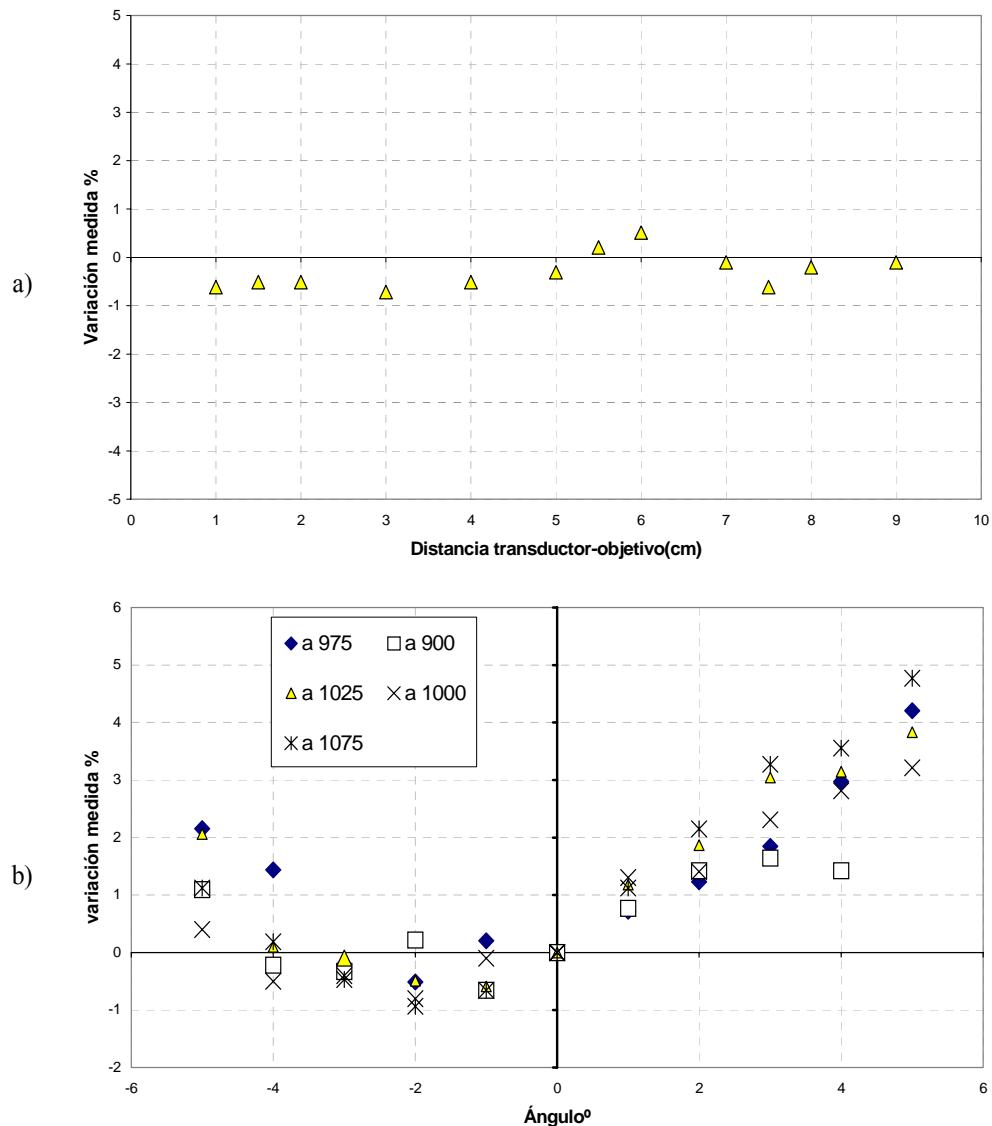


Figura C.1-5. Variación de medida del transductor en función de la distancia a) y el ángulo b).

El sistema ha sido instalado en la línea de producción número 6 de la acería que la compañía Global Steel Wire S.A. tiene en el polígono de Nueva Montaña en la cercanías de Santander, durante la parada técnica semanal del día 11 de octubre de 2001 [Madrugá, 2002-OFS]. Para el posicionamiento del transductor se utilizó una viga en forma de T diseñada y construida por personal de la empresa con una base perfectamente amoldada para sostener en transductor y dotada de unas facilidades para controlar tanto la distancia como la posición angular del transductor.

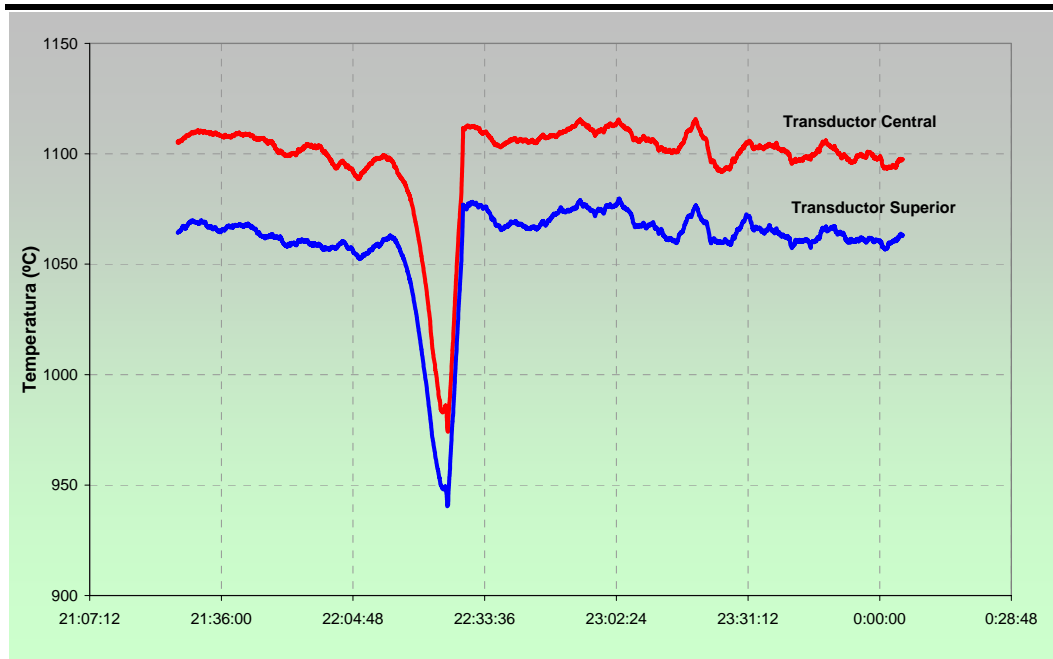


Figura C.1-6. Medida en campo de dos canales del transductor durante un intervalo de tiempo. Se recoge la parada técnica producida en torno a las 22:25h para la reposición de la cuchara. Las variaciones en la temperatura recogida están dentro de la normalidad, correspondiendo las diferencias de alrededor de 50 °C entre el transductor superior y el central con aquellas observadas en otro momento, Figura C.1-2.c , cuando se usaron cámaras termográficas.

Los resultados sobre las medidas obtenidas fueron cotejados con los registros de fabricación donde se especifican todos los parámetros de fabricación, temperatura de la colada, velocidad instantánea de la maquina de colada continua, sustitución de la cuchara, fin de la colada, caudal de agua de la cámara de enfriamiento, etc..., con el fin de observar el correcto funcionamiento desde un punto de vista cualitativo. La Figura C.1-6 muestra el histórico de medidas correspondientes a un día con parada técnica, donde muestra un reinicio de producción y un cambio de cuchara. Las diferentes muestras de temperatura han sido obtenidas con un intervalo de tiempo de 2 segundos entre ellas, siendo la velocidad de la maquina de colada de 1.5m/min.

C.2 Proyecto ECOPLE⁵⁴

La gestión de desechos radiactivos de alta actividad es una problemática a nivel mundial tratada y solucionada en conjunto entre los organismos competentes de países que poseen centrales nucleares de potencia. El transporte y almacenamiento de residuos nucleares provenientes de plantas de energía nuclear, del campo de la medicina o de la industria armamentística ha resultado, resulta y resultará un campo de investigación de importantes connotaciones para cualquier gobierno. El material radiactivo requiere su transporte desde los suministradores a las instalaciones usuarias y posteriormente de los residuos radiactivos generados por éstas hasta los centros de tratamiento. Se estima que en el mundo se efectúan al año decenas de millones de envíos de material

⁵⁴ PROYECTO: “Estudio de viabilidad para monitorizar el proceso de enfriamiento del COlado de PLOmo en contenedores de combustible nuclear a través de técnicas de Espectroscopia Infrarroja” (ECOPLEI).

radiactivo: tan sólo en la Comunidad Europea el número de bultos transportados durante un año supera el millón y medio.

Los transportes se realizan por tierra, mar y aire y su seguridad descansa fundamentalmente en la seguridad del embalaje que cumplirá una serie de exigencias en su diseño y procedimientos operacionales según el riesgo del material que se transporte. A partir de una determinada actividad del material radiactivo (parámetro directamente relacionado con el riesgo) el bulto debe ser capaz de resistir condiciones de accidente severo. El diseño de estos containers debe cumplir rigurosamente con las regulaciones que en España corresponden a una serie de reglamentos de aplicación internacional, basados en el Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos del OIEA. El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) ha publicado un documento que informa resumidamente de los requisitos que han de cumplir los diferentes tipos de bultos, su denominación es SDB-11.07: el transporte de los materiales radiactivos.

Los objetivos básicos de los requisitos que la reglamentación impone a los contenedores radiactivos son:

- La contención de los materiales radiactivos dentro de los embalajes.
- El control de la radiación externa en el exterior de los bultos.
- La prevención de la criticidad cuando se transportan materiales fisionables.
- Evitar los daños debidos al calor emitido por ciertos tipos de bultos.

Diseñados para el confinamiento de radiaciones muy energéticas, los contenedores han de estar fabricados de materiales muy densos, como el plomo o el hormigón, barreras de materiales capaces de detener el poder de penetración de las radiaciones.

Motivación

El proceso de construcción de contenedores nucleares conlleva un importante control de la temperatura según se enfría la colada de plomo que les da la forma. El objetivo es monitorizar e interpretar el proceso de enfriamiento del plomo, a través de termografía infrarroja, durante la fabricación de contenedores destinados a combustible nuclear en la empresa ENSA.

Una vez que el plomo es colado y está perfectamente distribuido en la estructura que le da forma, como la presentada en la Figura C.2-1, éste sufre de un enfriamiento que ha de ser controlado para evitar la generación de burbujas y tensiones internas que reducirían la calidad contenedora de radiación del mismo. El uso de la termografía infrarroja se presenta como una solución apropiada a la inspección térmica de toda la superficie (de varios metros de alta) permitiendo una correlación entre lo que ocurre en el interior de la estructura y la temperatura superficial. Los datos más relevantes aportados por esta tecnología podrían ser el gradiente de temperatura en cada fase de enfriamiento tanto transversal como horizontalmente.

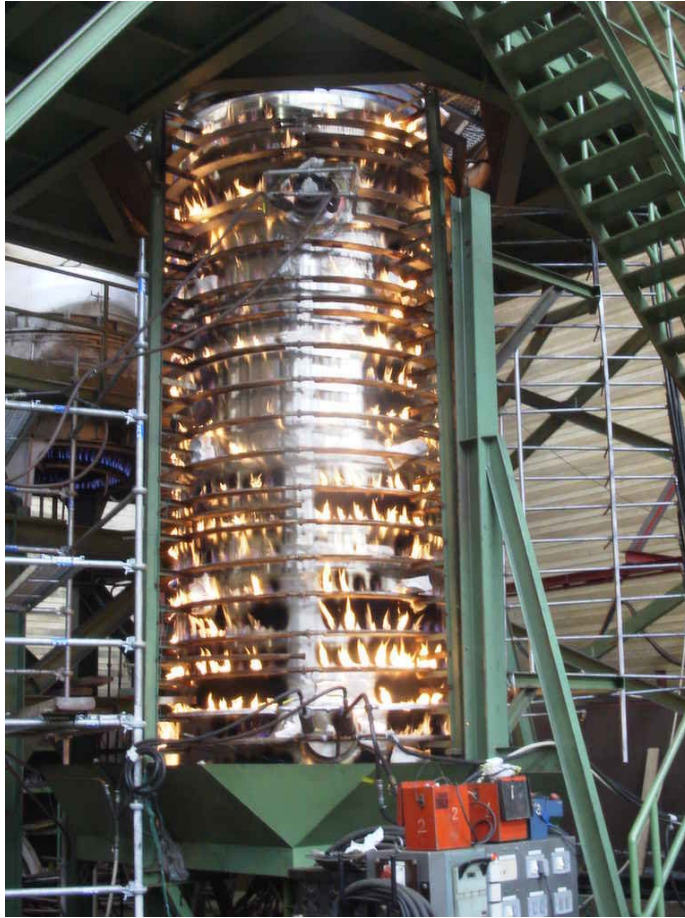


Figura C.2-1. Vista general de la colada de un contenedor nuclear. Se muestran los niveles discretos de aplicación de calor en estratos horizontales con los que se controla el enfriamiento de toda la pieza.

Resultados y trabajos realizados

Existen dos tipos de procesos de enfriamiento en la fabricación de estos contenedores nucleares:

- Mediante agua y aire, siguiendo una línea de abajo arriba de diferentes estratos definidos en el contenedor por los aros de calentamiento.
- Global de todo el contenedor, evitando gradiente térmicos, que puedan deformar el contenedor.

En ambos casos, la posibilidad de medir la temperatura del contenedor de forma externa de forma precisa será viable siempre que se disponga de una medida de referencia para determinar las emisividades de los puntos a considerar. Esta problemática puede ser solucionada aplicando un spray de pintura negra, con emisividad alta y conocida, en los puntos y/o áreas definidos como de interés. Otra alternativa pasa por tomar como referencia valores de los termopares instalados; que implica un error en la medida pero no superior a un 2-3%, es decir, inferior a 9°C en el peor caso.

Además, existe una incertidumbre generada por la aparición de llamas. Sin embargo, el efecto de las llamas puede ser evitado al aparecer zonas libres de ellas en el campo de visión entre la cámara y la superficie del contenedor, que pueden ser utilizadas para la medida. De todos modos, la presencia de llamas en

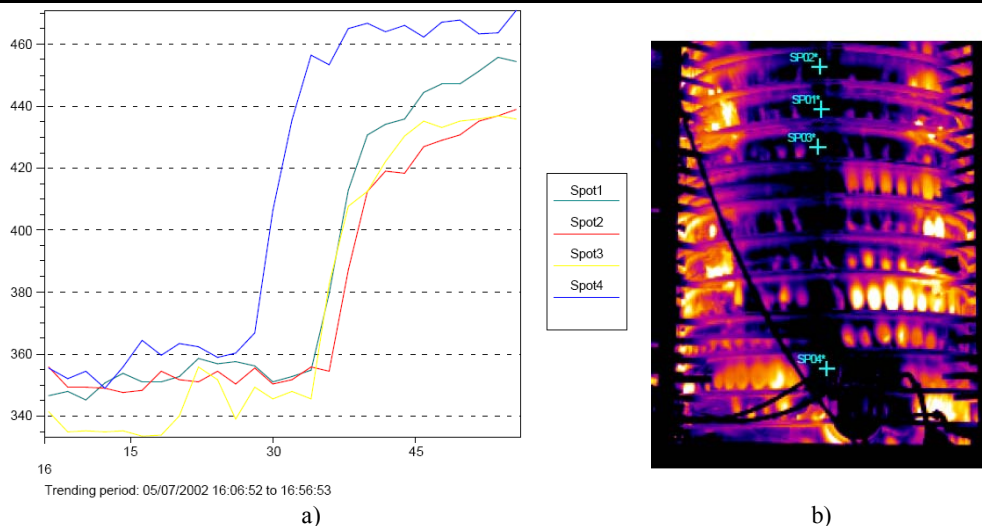


Figura C.2-2. Colada de plomo del día 05/07/2002 a las 16:25 horas. Para su control se realizaron un total de 31 capturas con intervalo de tiempo entre capturas de 2 minutos, desde unos 20 minutos antes del comienzo del vertido hasta 15 minutos después. a) Evolución temporal de la temperatura que presentan los puntos señalados en la figura b). Se observa el aumento de temperatura debido a la transferencia de calor entre plomo y paredes que lo albergan. Se deduce por lo tanto que el plomo vertido se encontraba a una temperatura muy superior a su punto de fusión y por lo tanto perfectamente licuado. Además también se determina la temperatura del contenedor previa al vertido, situándose entre 20 y 40 °C por encima de los 327°C de la temperatura de fusión de plomo, lo que nos lleva a afirmar que el plomo no estará nunca sometido a una temperatura inferior a la de fusión.

el campo de visión puede ser interpretada como una variación cuasiperiódica (longitudinalmente) y, por lo tanto, la temperatura del objetivo se estima desde el valor medio y mínimo de esa función.

El primero de los procesos, enfriamiento por estratos, consiste en:

- Calentar completamente el contenedor a una temperatura de 340-350°C antes de iniciar el colado del plomo, como se observa en las evoluciones de la Figura C.2-2.
- Verter el contenido del plomo licuado entre las paredes laterales del contenedor.
- Mantener el contenedor a temperaturas superiores a la de fusión del plomo para conseguir una distribución uniforme y homogénea del plomo por todo el volumen.
- Proceder al enfriamiento desde la parte inferior del contenedor hasta la superior de forma escalonada determinada por los aros; primero eliminando la fuente de calor y enfriando por el paso de calor al aire y, posteriormente, acelerándolo con agua. La Figura C.2-3 recoge el control establecido en este proceso.

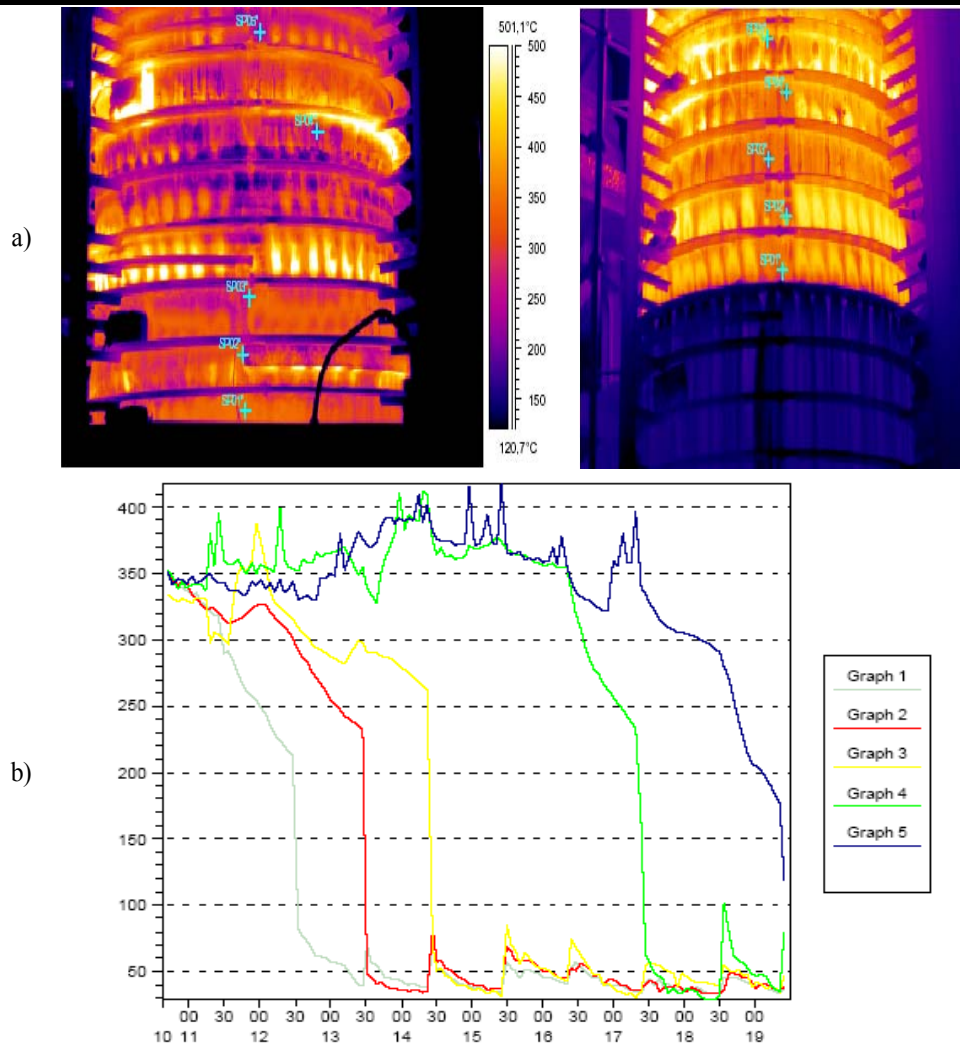


Figura C.2-3. a) Imágenes termográficas de la estructura de colada de plomo siguiendo el proceso de calentamiento y enriamiento por agua y aire y b) Evolución temporal de los puntos seleccionados (de abajo arriba) en la primera de las gráficas de a). La medida de la zona inferior comenzó el día 11/06/2002 a las 10:38 horas. Se realizaron un total de 131 capturas con intervalo de tiempo entre capturas de 4 minutos con lo que esta tarea terminó a las 19:30. El seguimiento de los puntos nos permite determinar las pendientes de caída según la fase en la que se encuentren. Además nos permite determinar el paso por 327 °C, punto de fusión del plomo.

El segundo proceso consiste en:

- Calentar completamente el contenedor a una temperatura de 340-350°C, con especial incidencia en los muñones, zonas donde las paredes son más gruesas y además presentan recovecos donde fácilmente puede solidificar el plomo rápidamente provocando poros o burbujas.
- Verter el contenido del plomo licuado entre las paredes laterales del contenedor.
- Mantener el contenedor a temperaturas superiores a la de fusión del plomo para conseguir una distribución uniforme y homogénea del plomo por todo el volumen.
- Ir reduciendo de forma gradual la temperatura global del contenedor evitando gradientes térmicos por encima de un valor determinado. La Figura C.2-4 muestra tales evoluciones. Con ello se consigue que no se

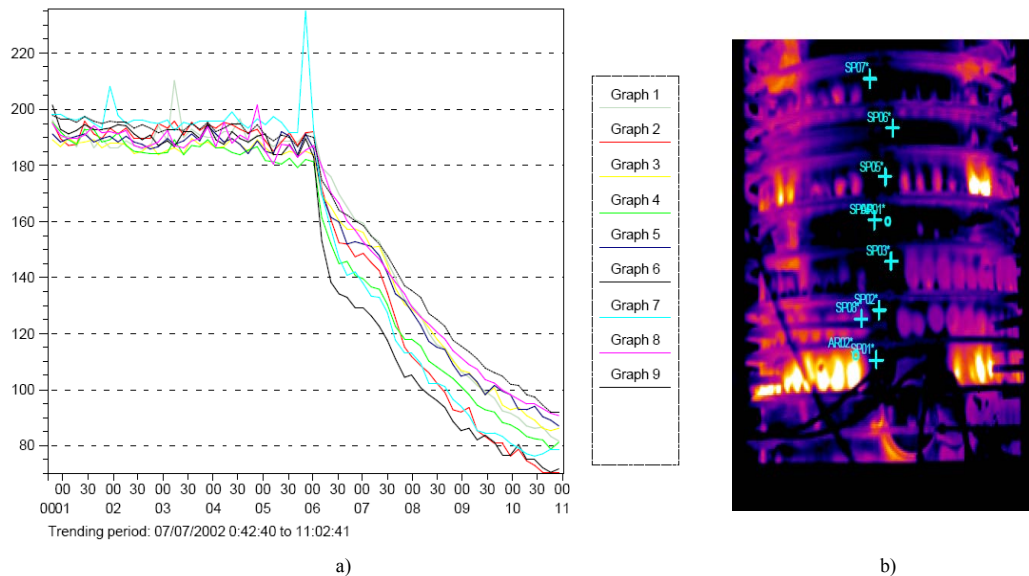


Figura C.2-4. Tras reducir la temperatura homogéneamente durante 37 horas, a las 6:00 fueron apagadas todas las fuentes de calor y el contenedor se enfría progresivamente por contacto con el aire. a) Evolución temporal de la temperatura que presentan los puntos señalados en la figura b). Se observa que previo a la desconexión de las fuentes de calor, la diferencia térmica entre los puntos es menor de 20°C.

produzcan fuerzas de dilatación o compresión que deformen el contenedor.

Las limitaciones en los resultados vienen dadas por:

- El uso de una única cámara, lo que condiciona la visión del perímetro del contenedor a aproximadamente 1/3 del total.
- La superficie no-plana a medir, que conlleva una visión no perpendicular en toda la superficie objeto de la captación, y con ello diferencias en la emisividad de los distintos puntos de la imagen.
- La presencia de llamas entre la cámara y el objeto, lo que dificulta la visión nítida del mismo, produciendo cambio de transmisividad en el camino de captación de la radiación.

C.3 Propuesta de Proyecto EIKA

Los focos vitrocerámicos son elementos que se integran en las encimeras de las cocinas vitrocerámicas, siendo la fuente de calor de las mismas. De entre los tipos existentes destacan los de fleje, elementos que consiguen un tiempo rápido de encendido. La comprobación del buen funcionamiento de este tipo de foco lleva a definir una serie de pruebas, entre las que se cuenta una inspección visual por parte de un operario de la perfecta disposición de fleje, así como de las grapas que lo sujetan.

Motivación

Los defectos más comunes son inherentes al proceso de producción y se pueden concluir en tres, principalmente:

- Falta de grapas.

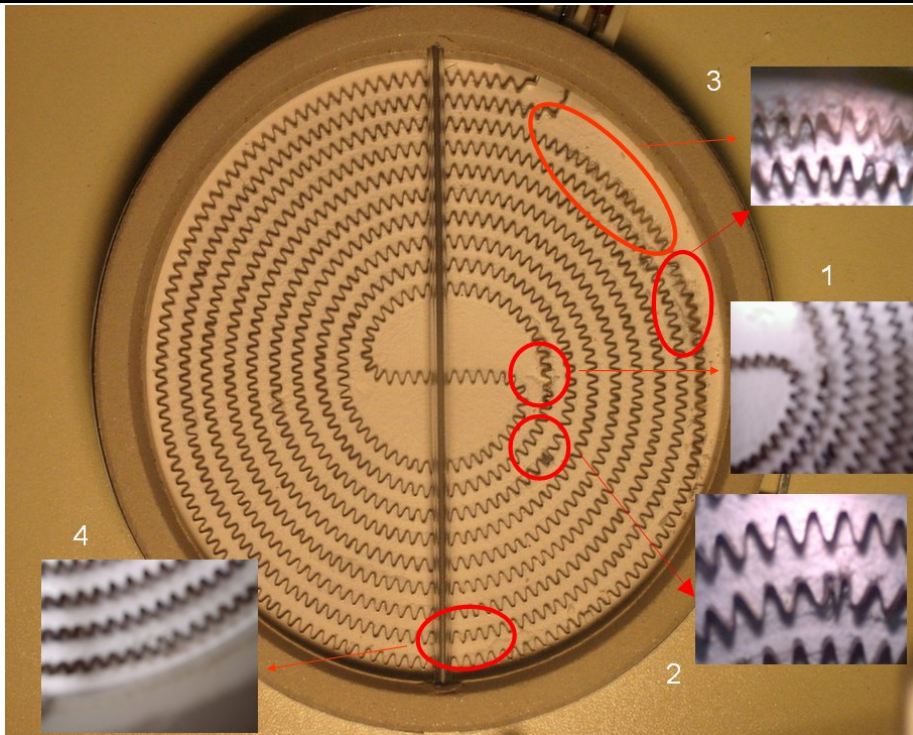


Figura C.3-1. Cocina de único fleje con defectos naturales y otros inducidos artificialmente. Las fotos de las zonas ampliadas están acompañadas de números que representan el tipo de defecto observado: 1) grapa deficiente que no está correctamente anclada al sustrato; 2) unión de segmentos de fleje; 3) región con el elemento resistivo flotando sin contacto sobre el sustrato; y 4) región donde el fleje está semienterrado en el sustrato.

- Acumulación de espiras en el fleje.
- Falta de material o cortes en el fleje.

La inspección visual permite determinar el primero de los tipos de defectos de una forma relativamente sencilla y, sólo en algunos casos, los demás, ver la Figura C.3-1. Pero todas las observaciones deben realizarse de forma muy detallada y por lo tanto muy lenta. La necesidad de automatizar el proceso y eliminar la componente humana de dicho proceso plantea la posibilidad de dar solución a este problema utilizando técnicas como la termografía infrarroja.

Resultados y trabajos realizados

Algunos de los tipos de defectos mencionados exhiben un comportamiento térmico similar que se traduce en un sobrecalentamiento o enfriamiento local en el fleje que es fácilmente captado por una cámara infrarroja como se aprecia en la Figura C.3-2. La razón de tales comportamientos es simple, una vez que se analizan las condiciones de transferencia de calor para cada caso en particular. Así, la existencia de grapas es detectada por la ausencia de uniformidad a lo largo del recorrido del elemento calentador presentando spots locales un poco más fríos que sus alrededores. Esto es explicado por el hecho de que las grapas presentan un aporte extra de superficie en contacto con el aire y, por tanto, el calor se disipa más rápidamente. Áreas localmente más frías también son motivadas por estiramientos de las espiras del fleje. Por el contrario, áreas o puntos más calientes de lo normal se corresponden con puntos en los que las espiras se solapan o donde se produce una unión de tramos de fleje (son soldados con un aporte de material extra que aumenta la resistencia y, consecuentemente la temperatura, al paso de la corriente eléctrica). Finalmente, los efectos de un deficiente contacto entre el fleje y el sustrato, bien por falta de contacto bien por soterramiento del fleje en el sustrato, provocan un emborronamiento de la imagen infrarroja de ese área (el efecto de la convección del aire se acentúa o se minimiza) mostrando valores de temperatura menores o mayores de lo habitual respectivamente.

La excitación eléctrica empleada puede ser controlada de diferentes

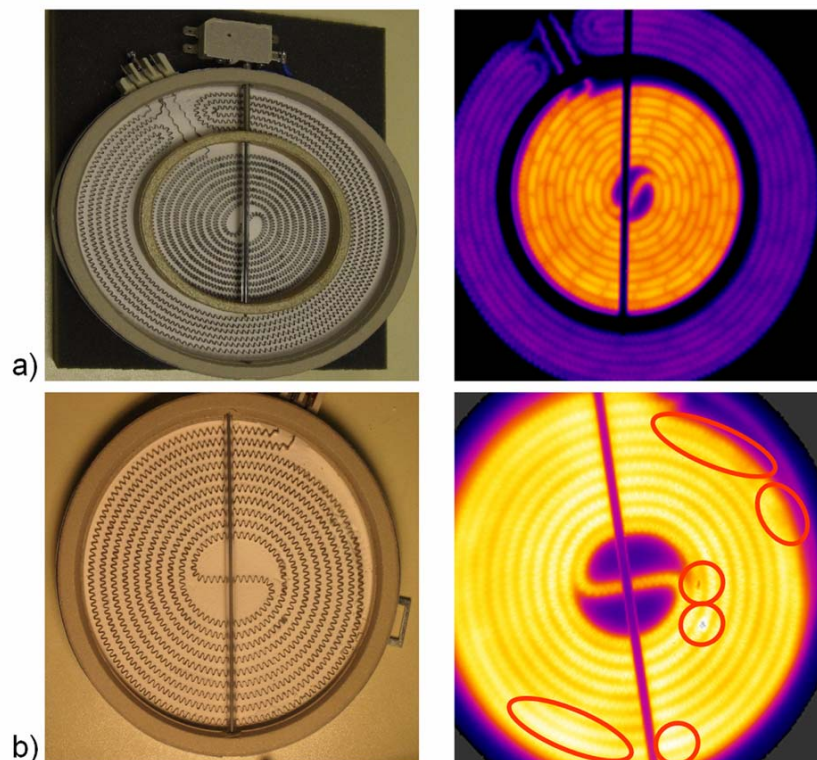


Figura C.3-2. Cocinas de a) doble y b) único fleje. En la columna de la izquierda se provee una imagen en el rango espectral del visible y en la columna de la izquierda un equivalente en el rango espectral del infrarrojo. Para la cocina de fleje sencillo, la imagen visible se corresponde con la de la Figura C.3-1, mostrando la que está a su derecha, imagen infrarroja, las áreas seleccionadas como defectuosas en la Figura C.3-1.

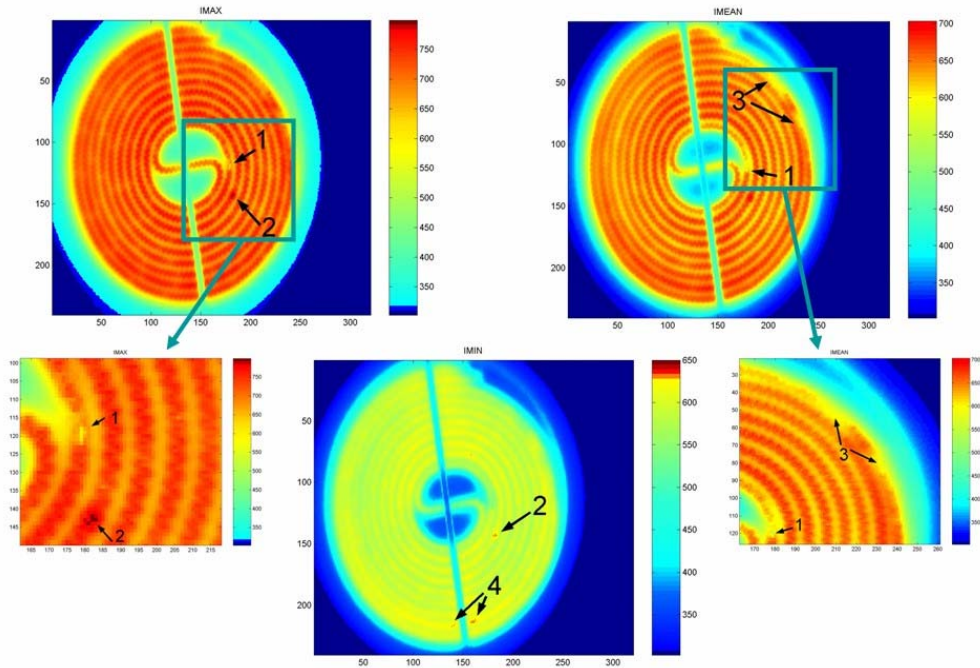


Figura C.3-3. Conjunto de imágenes procesadas de temperaturas máxima (IMAX), mínima (IMIN) y media (IMEAN) donde aparecen o no los defectos de la Figura C.3-1 lo que permite su análisis y su posterior clasificación.

formas. Sin embargo, la detectabilidad de los defectos es maximizada mediante el uso de transitorios ya que el sustrato es un material de alta capacidad térmica que difumina el calor en toda la cocina ocultando las variaciones locales predichas anteriormente. Así, se usan excitaciones en forma de rampa de 150 V con tiempos de subida y bajada de 10 s (duty cycle = 50%) llevando a la cocina a trabajar en un régimen transitorio muy lento con variaciones térmicas lo suficientemente altas como para producir contraste entre los elementos defectuosos y su entorno [González, 2005-NDTE]. De igual forma, se usan transitorios de alta velocidad de respuesta casi impulsional, 0.1 s, que administran la energía suficiente para que la cámara infrarroja sea capaz de captar los contrastes entre los defectos y las zonas libres de defectos [González, 2005-Varsovia]. El beneficio de esta última forma de excitación, además de una menor energía consumida, radica en el tiempo requerido para la inspección, la condición de seguridad en la inspección que da el no alcanzar altas temperaturas y la menor degradación del producto como consecuencia del uso.

La detección de los defectos es apoyada por procesados específicos que simplifican la toma de decisión sobre el origen de las anomalías. Por ejemplo, examinando el conjunto de imágenes de la temperatura máxima, mínima y el valor medio alcanzado por cada píxel (Figura C.3-3) o analizando las pendientes (velocidad) de calentamiento y enfriamiento en el caso de una excitación en forma de rampa, como anteriormente se presentó, se obtiene además una clasificación de los defectos [González, 2005-NDTE]. Para el caso de una excitación impulsional, el estudio del histograma en cualquier imagen ya sea durante la etapa de calentamiento o durante la etapa de enfriamiento arroja la misma información (detección y clasificación) de los defectos [González, 2005-

Varsovia] al igual que utilizando transformadas propias de otros campos de la ciencia [González, 2005-Orlando].

La localización de los defectos también es apoyada por distintos procesados. Así, técnicas propias del tratamiento de imagen permiten un procesado morfológico del patrón de bobinado del fleje [González, 2005-NDTE].

C.4 Referencias

- [Gonzalez, 2005-NDTE] D.A. González, F.J. Madruga, M. A. Quintela, J.M. López-Higuera, Defect assessment on radiant heaters using infrared thermography, *NDT&E Internacional*, vol. 38, n. 6, pag. 428- 432, 2005.
- [González, 2005-Orlando] D.A. González, F.J. Madruga, C. Ibarra-Castanedo*, O. Conde, J.M. López-Higuera, Quality Control on Radiant Heaters Manufacture, ThermoSense XXVIII (SPIE Conference Number OR32-Part of SPIE's Defense & Security Symposium) vol. 6205, Orlando (Kissimmee) - Florida – USA, 2006.
- [González, 2005-Varsovia] D.A. González, F.J. Madruga, M. A. Quintela, J.M. López-Higuera, Quality Control of Radiant Heaters, *Proceedings de International Congress on Optics and Optoelectronics*, Warsaw (Poland), 2005.
- [Madruga, 2001-OdimapIII] F.J. Madruga, D. González, V. Alvarez, J. Echevarria, Javier Hierro* & J.M. López-Higuera, "Longitudinal "Scale" defects detection on steel bar production industry", IEEE-LEOS, *ODIMAP III Proceedings*, Pavia, Italia. Septiembre 2001.
- [Madruga, 2002-ECNDT] F.J. Madruga, V. Álvarez, D. González, M. Angeles Quintela, Javier Hierro*, J.M. López-Higuera, "Non-Contact Measurement Of High Temperature On Steel Bar Production Industry Using Fiber Optic Sensing Technology", *8th. ECNDT Proceedings*, Barcelona, España, Junio 2002
- [Madruga, 2002-OFS] F.J. Madruga, D. González, V. Álvarez, Juan Echevarria, Olga M. Conde, J.M. López-Higuera, "Field Test Of Non Contact High Temperature Fiber Optic Transducer In A Steel Production Plant ", *OFS'2002, 15th International Conference on optical Fiber Sensors, 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, Portland, USA, Mayo 2002

D Técnicas de procesamiento de imágenes en secuencias termográficas

La termografía activa es una técnica de evaluación no destructiva (END) de materiales cuyo objetivo principal es la detección o la caracterización de defectos internos. En el proceso de inspección, la pieza analizada es sometida a una fuente externa de energía para incrementar el contraste térmico entre las zonas libres de defectos y aquellas que presenten defectos eventuales. Los cambios térmicos en la superficie son registrados con la ayuda de una cámara infrarroja. Sin embargo, la señal proveniente de la superficie de la muestra es débil y contiene altos niveles de ruido por lo que las etapas de preprocesado, procesado y postprocesado son fundamentales.

D.1 Preprocesado de secuencias termográficas – Precisión y exactitud en la medida de temperatura

El principio de detección de defectos se basa en el hecho de que el frente térmico se propaga homogéneamente a través del material salvo en presencia de inhomogeneidades o defectos. Si hubiera algo en el interior del material que tuviera diferentes propiedades térmicas, la conducción del calor sufriría variaciones y esto se reflejaría en la superficie de la muestra mediante la aparición de puntos de contraste térmico y que pueden ser detectados con la ayuda de una cámara infrarroja. Por lo tanto, la precisión en la medida de temperaturas debe estar garantizada y es por ello que existe un preprocesado con el que se pretenden minimizar los efectos de la óptica y la electrónica que captura los valores de esa temperatura superficial. Éste cubre diversas etapas como se presenta a continuación.

Regeneración de píxeles defectuosos (badpixels)

La primera etapa de preprocesado consiste en regenerar los píxeles defectuosos (*badpixels* o píxeles muerto), 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 reemplazados por el valor promedio de su vecindad. El termograma no corregido de la Figura D.1-1a corresponde a una placa de acero con tres defectos (con diferentes formas pero ocupando la misma área) 348 ms después de haber sido sometida a un impulso de calor de 5 ms y 6.4 J. La Figura D.1-1b muestra el resultado después de restaurar los píxeles defectuosos. El encuadre y el ruido fijo son ahora más evidentes en esta imagen.

Corrección de Ruido Aleatorio

El ruido aleatorio es reducido principalmente con técnicas de suavizado o filtrado de la imagen o secuencias de imágenes. Puede aplicarse tanto en el dominio temporal como en el dominio espacial. Para el caso de un promediado temporal, se procura un sobre-muestreo de la experiencia térmica aumentando la frecuencia de la captura para preservar la información. Para el filtrado espacial, suele promediarse el valor de píxeles vecinos de forma lineal, mediante convoluciones uniforme (*box filter*) o de distribuciones gaussianas o de Butterworth, o mediante filtros no lineales como el filtro de valor medio.

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. La Figura D.1-1b 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 D.1-1c). 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*).

Corrección del encuadre (*vignetting*)

El encuadre (*vignetting*) es sin duda uno de los problemas más complejos en Termografía. El encuadre consiste en un oscurecimiento de las esquinas de los termogramas respecto al centro de los mismos debido a una exposición limitada en esas áreas (ver Figura D.1-1b). El procedimiento de corrección de encuadre requiere una etapa de calibración que involucra la toma de termogramas de cuerpo negro a diferentes temperaturas (en el rango de operación).

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 encuadre, la calibración en temperatura requiere la obtención de varias imágenes

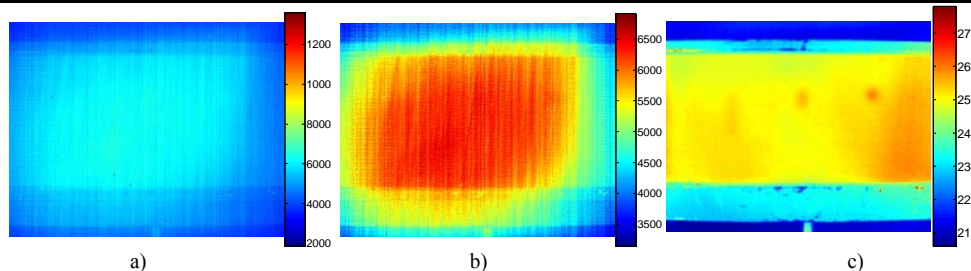


Figura D.1-1. Termogramas a $t=348$ msg: (a) no corregido; (b) tras restauración de píxeles defectuosos y (c) corrección de encuadre y del FPN. La conversión a valores de temperatura también ha sido llevada a cabo. El espécimen bajo inspección es una placa de acero de 2 mm de espesor con tres defectos del mismo área (25 mm^2) pero diferente geometría a la misma profundidad (1 mm).

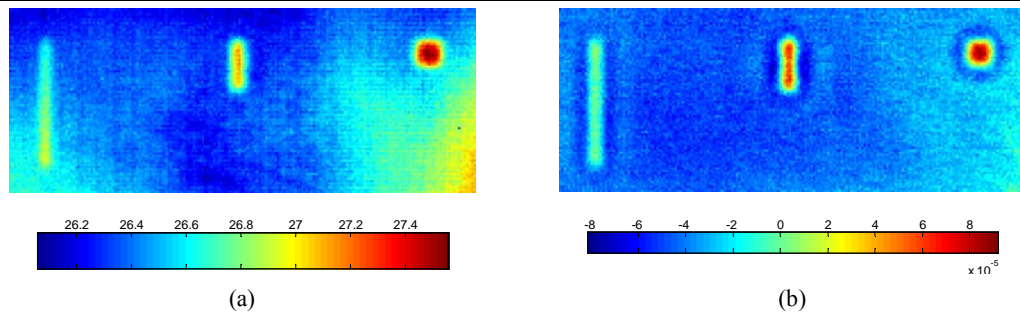


Figura D.1-2. (a) Termograma a $t=57$ ms; (b) imagen de los coeficientes a_1 en la ecuación D.2 de la placa de acero presentada en a)

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 D.1-1c muestra el termograma de la Figura D.1-1a corregido en píxeles defectuosos, FPN, encuadre, y transformado en temperatura.

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 tanto espacial como temporalmente, por ejemplo, el uso de un filtro gaussiano con determinada varianza o las técnicas de promediado por píxeles vecinos.

Reconstrucción de Señales Termográficas (TSR)

La reconstrucción de imágenes a partir de un polinomio constituye una de las técnicas más interesantes y útiles de filtrado del ruido [Shepard, 2001]. La idea es, partiendo de la ecuación de difusión de Fourier, modelar el comportamiento de las zonas libres de defectos que resulta ser un comportamiento lineal con una pendiente de $\frac{1}{2}$ en una escala logarítmica, es decir:

$$\ln(\Delta T) = \ln\left(\frac{Q}{e}\right) - \frac{1}{2}\ln(\pi) \quad \text{D.1}$$

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

$$\ln(\Delta T) = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 \ln^2(t) + \dots + a_N \ln^N(t) \quad \text{D.2}$$

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 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 D.1-2b presenta una imagen de los coeficientes a_1 en la ecuación D.1, en la que puede constatarse una mejora de la imagen reduciendo el ruido y aumentando el contraste sensiblemente.

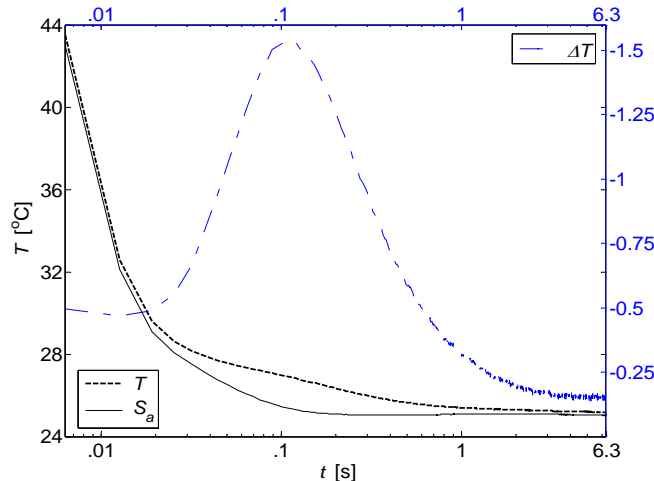


Figura D.2-1. Curvas características de la evolución de temperatura para una zona libre de defectos (sana o soundarea) (—), de temperatura para una región defectuosa (---) y de contraste térmico (-*-) para un defecto en forma de taladro hasta 1 mm de la superficie por la parte posterior de un espécimen de Plexiglas..

D.2 Procesado de secuencias termográficas – Modelado Directo

Una gran variedad de técnicas de procesado pueden ser utilizadas dependiendo de la aplicación. Los métodos de contraste térmico son sin duda los más utilizados por su simplicidad ya que consisten en el cálculo de diferencias de temperatura de zonas defectuosas respecto a una región de referencia (libre de defectos). Sin embargo, problemas tales como la no uniformidad de la estimulación térmica, diferencias de emisividad en la superficie y la geometría de la pieza, afectan fuertemente a los resultados. Técnicas de procesado más avanzadas permiten disminuir estos efectos y mejorar así la visibilidad de defectos.

Aunque la mayor parte de los algoritmos de procesado son desarrollados para termografía activa pulsada, por tratarse de la técnica más comúnmente utilizada, pueden ser modificados y adaptados a otras técnicas de inspección térmica infrarroja. Principalmente, se utilizan los métodos de contraste térmico [Maldague, 2001], la normalización [Zalameda, 2003], la termografía pulsada de fase (pulsed phase thermography, PPT) [Maldague, 1996] [Ibarra, 2005], la termografía de componentes principales (principal component thermography, PCT) [Rajic, 2002], el método de primera y segunda derivadas [Martin, 2003] y métodos de transformadas como Laplace y Wavelet [Ibarra, 2006].

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_{sa} , y una región defectuosa T_d [Maldague, 2001]:

$$\Delta T(t) = T_d(t) - T_{sa}(t) \quad D.3$$

La ecuación D.3 es el llamado contraste *absoluto* de temperatura y se ilustra en la Figura D.2-1. En ocasiones es conveniente utilizar variaciones de esta

definición como se recogen en [Maldague, 2001]. Sin embargo, todas estas definiciones sufren de un problema común, esto es, la necesidad de localizar una zona libre de defectos en la pieza en cuestión (hace falta entonces un conocimiento a priori importante) y la dependencia de los resultados con la elección realizada, ver la Figura D.2-2. En la práctica esto no es siempre posible y, alternativamente, el método de Contraste Absoluto Diferencial (DAC) [Pilla, 2002] 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, de forma que:

$$T(t) = T_0 + \frac{Q_0}{e\sqrt{\pi t}} \quad \text{D.4}$$

Combinando las ecuaciones D.3 y D.4, se llega a la siguiente expresión:

$$\Delta T_{dac} = T_d - \sqrt{\frac{t'}{t}} \cdot T(t') \quad \text{D.5}$$

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 se encuentra entre el tiempo de envío del impulso t_0 y el tiempo de aparición del primer defecto t_1 .

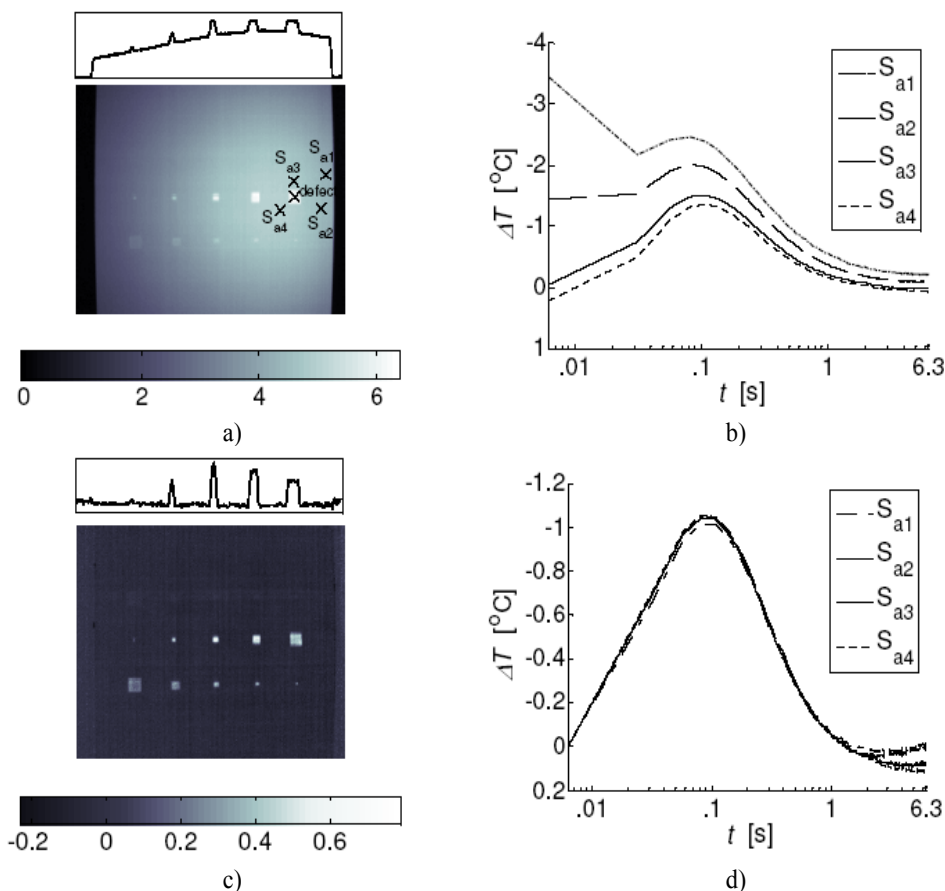


Figura D.2-2. a) Termograma después de la sustracción de la imagen fría para $t=209$ ms. La influencia de la excitación se refleja en la no uniformidad de las zonas de material sin defectos. b) Variación del contraste absoluto según el punto seleccionado como *soundarea* (4 S_a diferentes). c) Resultado de la aplicación del contraste diferencial, DAC, para $t=209$ ms d) contraste térmico para 4 *soundareas* diferentes, S_a . El DAC elimina la influencia de la no uniformidad en la excitación como se observa de la comparación de las figuras (b) y (d), al igual que (a) y (c).

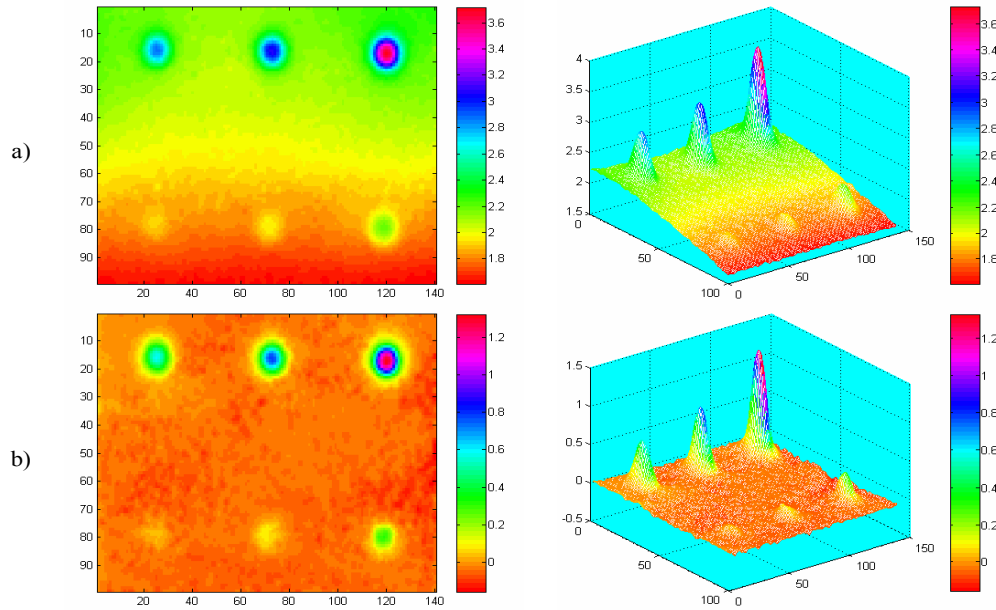


Figura D.2-3. a) Representaciones 2D y 3D de la imagen correspondiente a $t=4$ sc de una secuencia termográfica tras sustraer la imagen fría. b) Mismo termograma, $t=4$ s, tras la aplicación del algoritmo IDAC (automatización del DAC) a un espécimen de Plexiglas [Gonzalez, 2004-Odimap].

En realidad, la evolución de la temperatura en la superficie es un fenómeno 3D complejo, la ecuación D.4 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 ecuación D.5 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 como se desprende de la observación de la Figura D.2-3.

La normalización

La normalización es una técnica de procesamiento de secuencias termográficas donde la suma (promedio) del total de imágenes a ser procesadas es dividida por la media del conjunto de imágenes donde se observa el mayor contraste térmico de

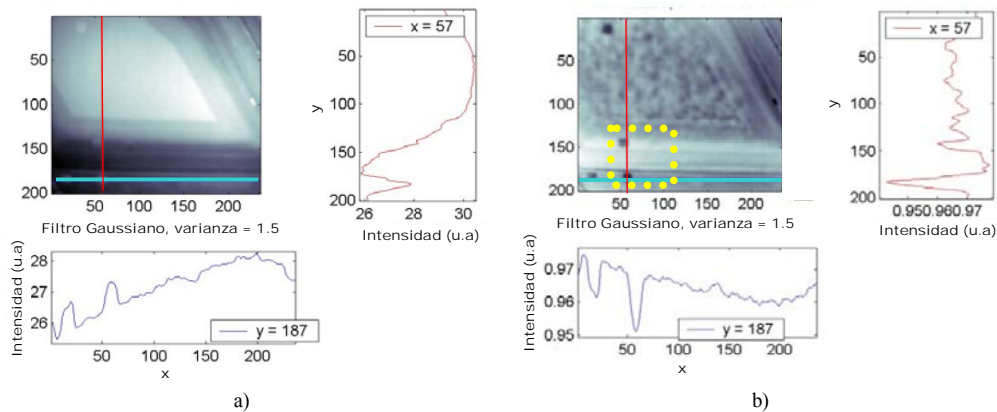


Figura D.2-4. Resultados del procesamiento de la normalización para un espécimen de Kevlar: a) termograma original (raw data) b) termograma normalizado dividiendo las imágenes de la 1 a la 25 por la suma de las imágenes de la 2 a la 11 [Ibarra, 2004-Pune]. La zona señalada con un marco punteado amarillo hace referencia a la Figura D.2-7.

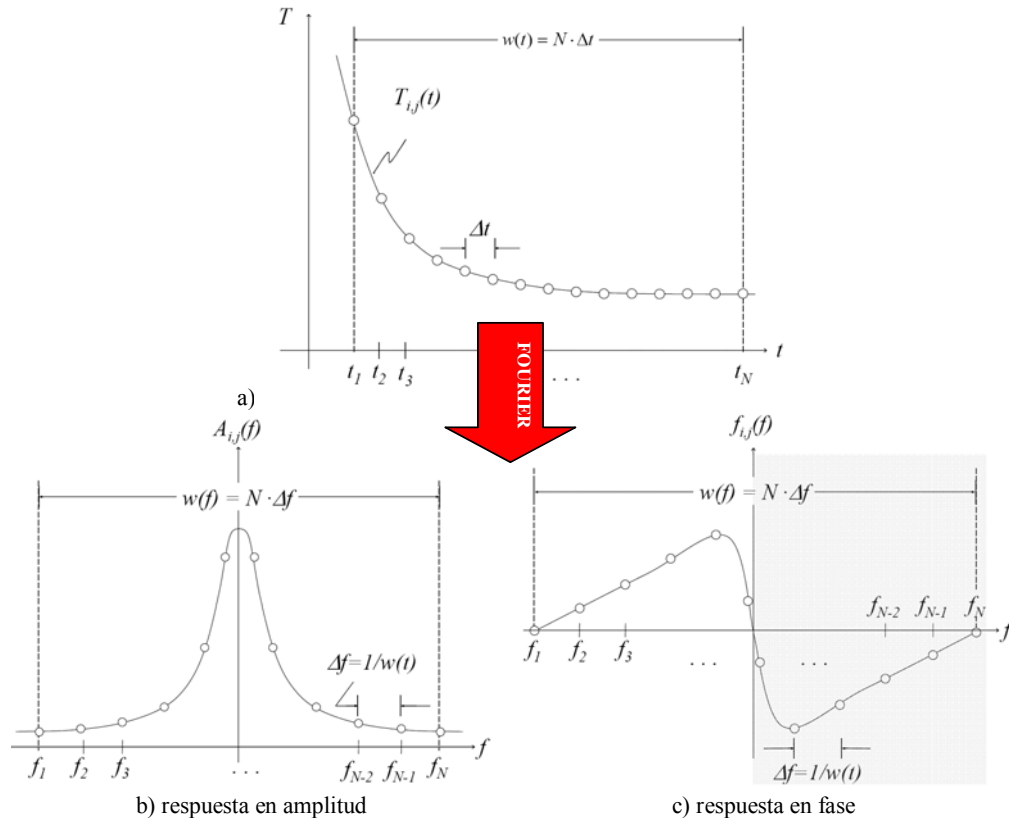


Figura D.2-5. a) Perfil de temperatura para un píxel en una zona libre de defectos (i,j). b) Perfil en amplitud y c) fase, tras la transformación de Fourier de la evolución temporal de a).

la zona de interés (por ejemplo, la zona de una defecto subsuperficial) [Zalameda, 2003]. Obviamente, la dificultad estriba en reconocer ese conjunto de imágenes que resultan relevantes. Pero una vez obtenido, la normalización produce un importante realce del contraste y minimiza el impacto de la no uniformidad de la excitación de calor como puede apreciarse en la Figura D.2-4.

Termografía de Fase Pulsada (PPT)

La Termografía de Fase Pulsada [Maldague, 1996] (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) [Bracewell, 1965]:

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) e^{-j2\pi nk/N} = \text{Re}_n + i \text{Im}_n \quad \text{D.6}$$

donde n corresponde a los incrementos de frecuencia ($n=0,1,\dots,N$); Δt es el intervalo de tiempo entre adquisiciones y 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 :

$$A_n = \sqrt{\text{Re}_n^2 + \text{Im}_n^2}, \quad \phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}_n}{\text{Re}_n} \right) \quad \text{D.7}$$

Cualquier función puede ser descompuesta en sinusoides y, en particular, la evolución temporal de la temperatura superficial de un objeto bajo excitación

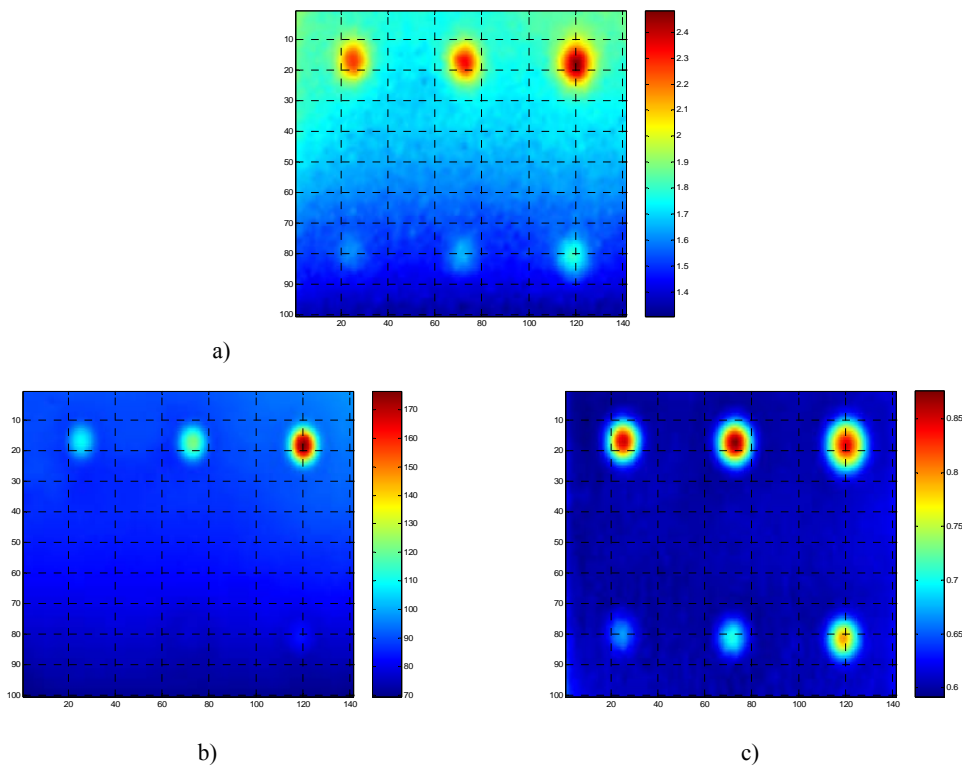


Figura D.2-6. a) Imagen de datos puros (sin procesar). Tras la transformación de Fourier de la secuencia se obtienen b) imagen de la amplitud c) imagen de la fase. Claramente se observa la no uniformidad de la excitación en la imagen a). La imagen c) representa una menor influencia de la no uniformidad del calentamiento en la fase. Además, los defectos son más visibles.

pulsada da lugar a una respuesta en amplitud y en fase que son de forma par e impar, respectivamente, respecto a la frecuencia $f=0$ Hz, como se presenta en la Figura D.2-5. A partir de estas respuestas a la evolución de cada píxel, se procesan secuencias de amplitud y fase para toda la superficie en forma de imágenes.

La fase es particularmente interesante en ensayos no destructivos ya que es menos afectada por los problemas típicos de la termografía activa, como son, reflexiones del entorno, variaciones de emisividad, calentamiento o excitación no uniforme, geometría de la superficie y su orientación [Ibarra, 2005]. La Figura D.2-6c muestra una imagen de fase, o *fasegrama*, obtenida al aplicar la PPT a la secuencia corregida como en la Figura D.2-6a. Como puede observarse, se logra una mejora considerable del contraste entre zonas sanas y defectuosas gracias a la utilización de la fase. 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.

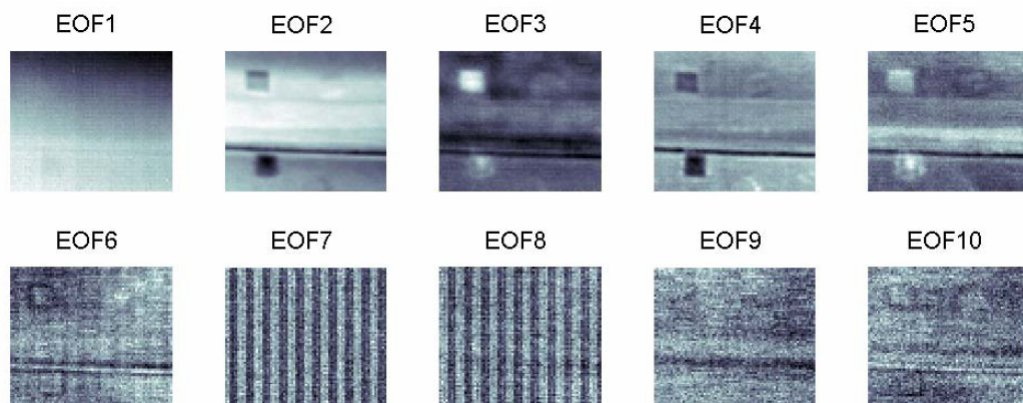


Figura D.2-7. Primeras 10 funciones EOF de una porción de Kevlar® mostrada en color amarillo en la FIGb (corner inferior izquierdo) [Ibarra, 2004-Pune].

Componentes principales

El procesamiento basado en componentes principales (Principal component thermography, PCT) descompone la variación temporal de la temperatura superficial de un espécimen bajo excitación pulsada usando un conjunto de funciones estadísticas ortogonales conocidas como Empirical Orthogonal Functions o EOF). Éstas son obtenidas a partir de la descomposición en valores singulares (Singular Value Decomposition, SVD) de las matrices de datos termográfico-temporales [Rajic, 2002]. Una muestra puede ser observada en la Figura D.2-7.

Primera y segunda derivadas

La evolución temporal de la temperatura superficial de un cuerpo no debe presentar cambios en su pendiente (primera derivada) a no ser que se evalúe un área situada en una zona con defecto subsuperficial. De igual forma, la evolución de pendiente de la primera derivada (segunda derivada) también presenta cambios que están directamente relacionados con la presencia a determinada profundidad de las anomalías.

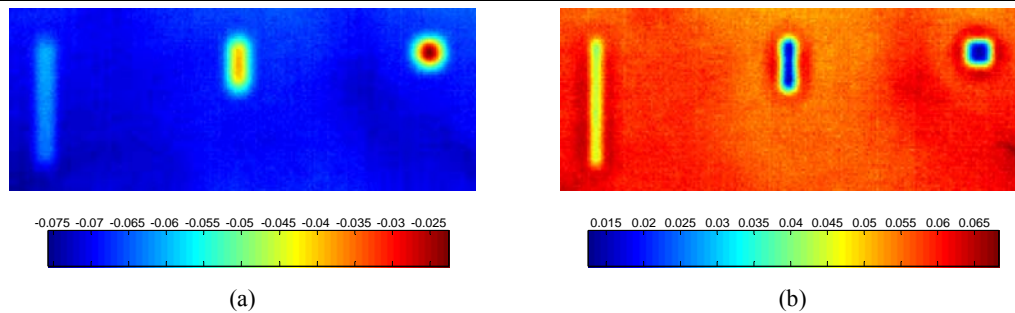


Figura D.2-8. (a) Imagen de primera derivada temporal a $t=57$ ms y (b) segunda derivada temporal a $t=57$ ms extraídas tras la aplicación de un algoritmo de reconstrucción TSR, ver Figura D.1-2.

Otro punto interesante de la TSR presentada previamente es que permite fácilmente la reconstrucción de la primera y segunda derivadas temporales [Martin, 2003]. En general, las imágenes de derivadas temporales presentan un mejor contraste y son menos afectadas por el calentamiento no uniforme como puede verse en la Figura D.2-8a y Figura D.2-8b. en comparación con la Figura D.1-2.

Transformada Wavelet y transformada Laplace

Como complemento al uso de la transformada de Fourier, otras transformadas típicas de señales han sido adaptadas al procesamiento de secuencias de termografía activa pulsada [Ibarra, 2006].

En lugar de usar funciones sinusoidales infinitas como en el caso de la PPT, la transformada Wavelet usa ondas de duración limitada, lo cual es beneficioso para la transformación de funciones que contienen transitorios o variaciones abruptas. Aunque el espacio transformado carece entonces de componente frecuencial, el uso de wavelets preserva la característica temporal de la señal transformada mediante diferentes escalas o resoluciones del tiempo. Este detalle ha sido aprovechado para el análisis de secuencias termográficas [Galmiche, 2000].

Por otro lado, la transformada de Laplace reduce el problema de resolver ecuaciones diferenciales a un problema algebraico. Cualquier problema puede ser transformado al espacio de Laplace, resuelto en él y transformada inversamente la solución al espacio original. Esto ya fue propuesto por Carslaw para la resolución de los problemas de la transferencia de calor por conducción [Carslaw, 1921] pero no ha sido implementado hasta nuestros días ante el gran consumo de potencia de computación y la necesidad de unas herramientas de inversión apropiadas [Ibarra, 2006].

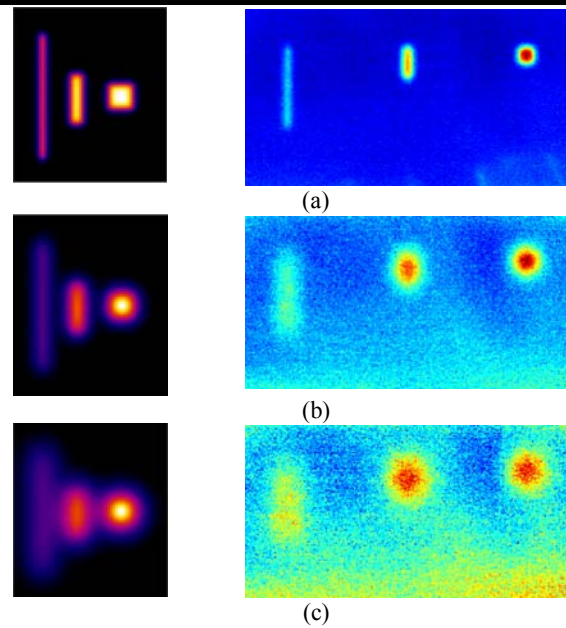


Figura D.3-1. Resultados de simulaciones (columna izquierda) y termogramas reales con sustracción de imagen fría (derecha) para una placa de acero de 2 mm de espesor con tres defectos del mismo área (25 mm^2) pero diferente geometría, a la misma profundidad (1 mm) y a tres instantes diferentes: (a) 0.1 s; (b) 0.5 s y (c) 1 s. Puede observarse claramente el efecto de la difusión del calor en el material.

D.3 Postprocesados de secuencias termográficas- Modelado Inverso

Además de los anteriores, se deben relacionar con la termografía todos aquellos procesados y tratamientos que permiten la extracción de información de las inspecciones realizadas. El objetivo es no sólo ayudar a detectar la presencia de los defectos sino caracterizarlos en la medida de lo posible con sus tamaños y profundidades.

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. Y, de igual forma, dada una observación, el modelado inverso permite, a partir de la reconstrucción de la experiencia, cierto conocimiento del espécimen. Por ejemplo, en la columna izquierda de la Figura D.3-1 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 la misma área (25 mm^2). A los termogramas reales, en la columna derecha, se les ha sustraído una imagen fría para reducir los niveles de ruido. Como puede verse, existe una gran similitud entre las predicciones y los termogramas reales.

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

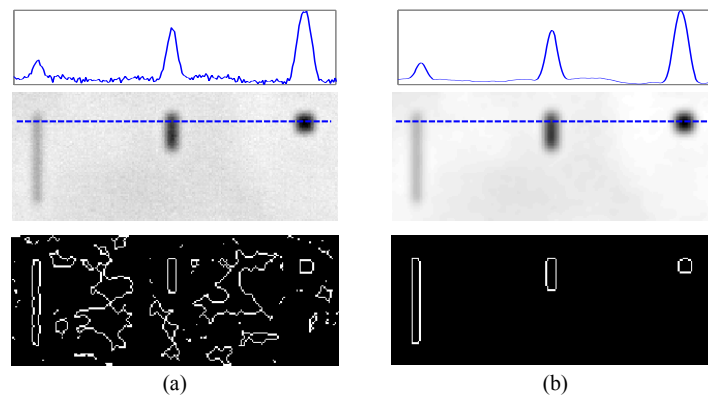


Figura D.3-2. Resultados de segmentación (a) fasegrama no filtrado; y (b) fasegrama filtrado con un filtro gaussiano de varianza $\sigma=2$.

III). Sin embargo, diferentes 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 Figura D.3-2 muestra el resultado de una segmentación basada en el método de Canny para la detección de bordes. Para la segmentación en la Figura D.3-2a se utiliza 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 D.3-2b donde un filtro gaussiano con varianza $\sigma=2$ es utilizado.

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. 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 D.3-1 que muestra los termogramas simulados y reales a tres tiempos diferentes. Como todo método basado en el contraste térmico, estas técnicas están sujetas a la disponibilidad y conocimiento de una zona sana y son afectados por el calentamiento no uniforme.

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

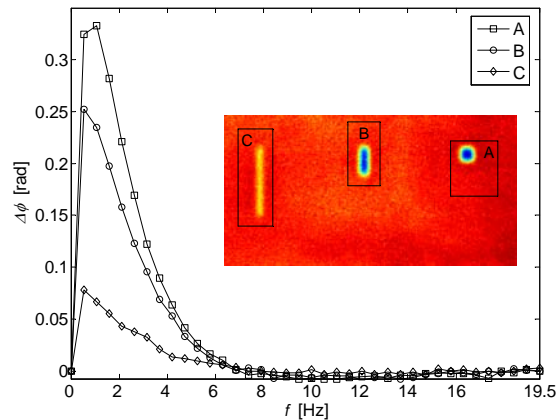


Figura D.3-3. Curvas de evolución de fase para diferentes regiones defectuosas.

los datos experimentales pueden ser sometidos a un proceso de regresión con una relación empírica de la forma:

$$z = A \cdot t_{\max}^{1/2} \cdot C_{\max}^h \quad \text{D.8}$$

donde los parámetros A y h se determinan por regresión.

En el dominio frecuencial, los métodos de inversión tanto en LT [Meola, 2004] como en PPT [Ibarra, 2004], se basan en una relación directa entre la profundidad z , y la difusividad térmica μ , evaluada a la frecuencia límite f_b [Ibarra, 2005]:

$$z = C_1 \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot f_b}} \quad \text{D.9}$$

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 D.3-3 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 de la geometría de los defectos (ver Figura D.3-1), 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 ecuación D.9.

D.4 Referencias

- [Bracewell, 1965] R. Bracewell, *The Fourier Transform and its Applications*, USA, McGraw-Hill, 1965.
- [Carslaw, 1921] H.S. Carslaw, *Introduction to the mathematical theory of heat in solids*, Macmillan, pag. 268, 1921.
- [Galmiche, 2000] F. Galmiche, X. Maldague, Depth defect retrieval using the wavelet pulsed phased thermography, *Proceedings de QIRT 6*, Eurotherm Seminar 64, D. Balageas, G. Busse, C. Carlomagno (eds.), Reims, France, pag. 194-199, 2000.
- [Gonzalez, 2004-Odimap] D.A. González, C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague, F.J. Madruga, J.M. López-Higuera, Quantitative Characteristics of Subsurface Defects using an Automated Absolute Contrast Method, 4th Topical Meeting on Optoelectronic

- Distance/Displacement Measurements and Applications, Oulu (Finland), IEEE-LEOS, *ODIMAP IV Proceedings*, 2004.
- [Ibarra, 2004] C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague, Pulsed Phase Thermographic Reviewed, *Qirt Journal*, vol. 1, no. 1, p 47-70, 2004.
- [Ibarra, 2004-Pune] C. Ibarra-Castanedo, D. González and X. Maldague, Infrared Image Processing for Nondestructive Applications, Keynote lecture, NDE 2004 National Indian Society annual conference, Pune (India), 25 p., 2004.
- [Ibarra, 2005] C. Ibarra-Castanedo, *Quantitative Subsurface Defect Evaluation by Pulsed Phase Thermography: Depth Retrieval with the Phase*, Ph. D. thesis, Université Laval, 2005.
- [Ibarra, 2006] C. Ibarra-Castanedo, D. González, F. Galmiche, X.P. Maldague, A. Bendada, Discrete signal transforms as a tool for processing and analyzing pulsed thermographic data, *Proceeding of ThermoSense XXVIII* (SPIE Conference Number OR32-Part of SPIE's Defense & Security Symposium vol. 6205.), Orlando (Kissimmee) - Florida – USA, 2006
- [Maldague, 1996] X. Maldague, S. Marinetti, Pulse phase infrared thermography, *Applied Physics*, vol. 79, pag. 2694–2698, 1996.
- [Maldague, 2001] X.P.V. Maldague, *Theory and Practice of Infrared Technology For Nondestructive Testing*, Ed. John Wiley & Sons, New York, 684 páginas, 2001
- [Martin, 2003] R.E. Martin, A.L. Gyekenyesi, S.M. Shepard, Interpreting the Results of Pulsed Thermography Data, *Materials Evaluation*, vol. 61 n. 5, pag. 611-616, 2003.
- [Meola, 2004] C. Meola, G.M. Carlomagno, Recent Advances in the Use of Infrared Thermography, *Measurement Science Technology*, vol. 15, p.27–58, 2004.
- [Pilla, 2002] M.C. Pilla, *A Novel Contrast Method for Pulse Thermography Data*, Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, 2002.
- [Rajic, 2002] N. Rajic, Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures, *Composite Structures*, vol. 58, pag. 521-528, 2002.
- [Shepard, 2001] S. M. Shepard, “Advances in Pulsed Thermography”, *Proc. SPIE, Thermosense XXIII*, vol. 4360, pag. 511-515, 2001.
- [Zalameda, 2003] J.N. Zalameda, N. Rajic, W.P. Winfree, A comparison of image processing algorithms for thermal non-destructive evaluation, in: K.E. Orlando, X. Cramer, X. Maldague (Eds.), *SPIE Proc. Thermosense XXV*, vol. 5073, pág. 374–385, 2003.

E Algoritmos de detección de patrones lineales

E.1 Algoritmo RANSAC

En esta sección se describe el algoritmo robusto general denominado **RAN**dOm **S**AmpLe **C**onsensus (RANSAC). El algoritmo se usa para el ajuste de una recta a una nube de datos, S , y actúa de la siguiente forma:

- Se seleccionan de forma aleatoria dos de los puntos de S . Estos dos puntos definen una recta.
- Determinar el conjunto de datos que están dentro de una distancia umbral del modelo. Es el soporte para esta recta y se mide por el número de puntos cuya distancia normal a la recta cae dentro de un umbral previamente fijado.

En este punto existen dos alternativas:

Si el número de puntos es mayor que un umbral de decisión, se estima el modelo usando todos los puntos de esa recta y se termina la selección.

Si el número de puntos es inferior a ese umbral de decisión, se selecciona un nuevo subconjunto se repite lo anterior.

- Esta selección aleatoria se repite un número de veces y la recta con mayor soporte se considera la recta robusta.

Deben tenerse en cuenta varias consideraciones:

- Los puntos dentro del umbral considerado se denominan “inliers” y el conjunto de puntos “inliers” a veces se denomina “conjunto de consenso”. Puntuar la línea con el número de puntos que la soportan tiene la ventaja de favorecer mejores ajustes, es decir, la línea con mejor soporte será la elegida.
- La selección del umbral se realiza de manera que con cierta probabilidad un punto cualquiera sea un “inlier”. Este cálculo necesita de la distribución de probabilidad para la distancia de un “inlier” desde el modelo. En la práctica esta distancia se suele elegir de forma empírica.
- En cuanto al número de muestras, no es necesario tratar todas las posibles combinaciones de dos puntos. El número de ensayos debe tomarse lo suficientemente alto como para garantizar, con una probabilidad p , que al menos uno de los conjuntos aleatorios de s puntos esta libre de puntos aberrantes.
- Si suponemos que ε es la probabilidad de que un punto sea aberrante, este valor será un porcentaje del tamaño total del número de puntos puede probarse que para las probabilidades dadas p y ε , el tamaño del número de muestras a tomar está dado por la expresión:

$$N = \frac{\log(1-p)}{\log(1-(1-\varepsilon)^p)} \quad \text{E.1}$$

Normalmente el valor de ε no será un valor conocido de antemano, por tanto es necesario usar un algoritmo iterativo que vaya readaptando los valores de ε y N al mismo tiempo que va extrayendo nuevas muestras.

Algoritmo Adaptativo:

- $N=\infty$, num_muestras=0
- Mientras $N >$ num_muestras repetir
- Elegir una muestra y contar el número de "inliers"
- Poner $\varepsilon=1-(\text{número de inliers})/(\text{total de puntos})$
- Recalcular el valor N a partir de ε y $p=0.99$
- Incrementar en 1 num_muestras
- Terminar

E.2 Transformada de Hough⁵⁵

La Transformada de Hough es un algoritmo empleado en reconocimiento de patrones en imágenes que permite encontrar ciertas formas dentro de una imagen, como líneas, círculos, etc. Es particularmente útil cuando la información es ruidosa.

La principal aplicación es su uso en técnicas de segmentación. Otras aplicaciones son: extracción de características, compresión y reconocimiento de imágenes (la versión más simple consiste en encontrar líneas).

En 1962 Hough interpretó la ecuación $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$ (una curva de tipo seno o coseno) como una ecuación con parámetros (x, y) y variables (ρ, θ) en lugar de una ecuación con parámetros (ρ, θ) y variables (x, y) . Todas las parejas (ρ, θ) que cumplen la ecuación para coordenadas dadas x y y en el espacio bidimensional describen líneas rectas que pasan por el punto (x, y) .

Su modo de operación es principalmente estadístico y consiste en que para cada punto que se desea averiguar si es parte de una línea se aplica una operación dentro de cierto rango, con lo que se averiguan las posibles líneas de las que puede ser parte el punto. Esto se continúa para todos los puntos en la imagen acumulándose todas estas curvas en el espacio de las variables (ρ, θ) (el "espacio de acumulación" o "espacio de Hough"). Al final se determina qué líneas fueron las que más puntos posibles tuvieron y esas son las líneas en la imagen.

Como una introducción a esta transformada, supongamos que dados n puntos en una imagen, deseamos encontrar subconjuntos de esos puntos que forman parte de líneas rectas. Una posible solución consiste en encontrar todas las rectas determinadas por cada par de puntos y así encontrar todos los subconjuntos de puntos que están próximos a rectas concretas. El problema que

⁵⁵Se recomienda la lectura de libros que versen sobre el tratamiento digital de la imagen. Las notas aquí presentes han sido obtenidas de apuntes de la asignatura de Tratamiento Digital de la Imagen de los profesores D. José Manuel Díaz López y D. Alfonso Martín Marcos de la Universidad Politécnica de Madrid presentes en la web:

http://www.diac.upm.es/acceso_profesores/asignaturas/tdi/tdi/tdi.htm

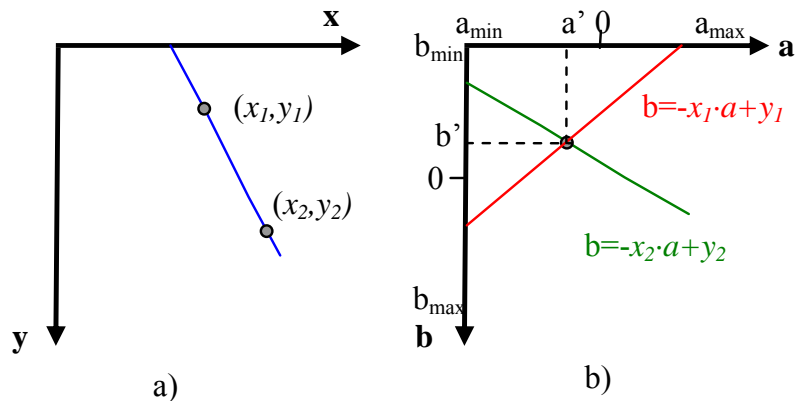


Figura E.2-1. a) Plano xy b) Espacio paramétrico con rejilla de cuantificación del plano paramétrico para su uso en la transformada.

surge con este procedimiento es que es necesario encontrar $\frac{n(n-1)}{2}$ líneas y luego, efectuar $\frac{n^2(n-1)}{2}$ comparaciones (de cada punto para todas las líneas) lo que supone apreciar la carga computacional que esto conlleva.

Una forma diferente usando un método propuesto por Hough considera un punto (x_i, y_i) y la ecuación en forma explícita de la recta $y_i = a \cdot x_i + b$. Hay un número infinito de rectas que pasan por (x_i, y_i) . Todas ellas satisfacen la anterior ecuación al variar los valores de a y b . Sin embargo, si escribimos la anterior ecuación de esta otra forma: $b = -x_i \cdot a + y_i$ y consideramos el plano ab (también conocido como *espacio paramétrico*), entonces tenemos la ecuación de una simple recta para un par fijo (x_i, y_i) .

Además, un segundo punto (x_j, y_j) tendrá asociada también una recta en el espacio paramétrico, y esta recta intersectará con la línea asociada a (x_i, y_i) en (a', b') , donde a' es la pendiente y b' es el término independiente de la recta que contiene tanto a (x_i, y_i) como a (x_j, y_j) en el plano xy . De hecho, todos los puntos contenidos en esta recta tendrán rectas en el espacio paramétrico que intersectan en (a', b') . Estos conceptos se muestran en la Figura E.2-1.

Subdividido el espacio paramétrico en las llamadas "celdas acumuladoras", los intervalos (a_{\min}, a_{\max}) y (b_{\min}, b_{\max}) son los esperados para los valores de la pendiente (a') y del término independiente (b'). La celda de coordenadas (i, j) , con valor acumulador $A(i, j)$, corresponde al cuadrado asociado a las coordenadas del espacio paramétrico (a_i, b_j) . Inicialmente, estas celdas están puestas a cero.

Para cada punto (x_k, y_k) en el plano imagen, igualamos el parámetro " a " a cada uno de los valores de la subdivisión permitidos en el eje a y resolvemos el valor " b " correspondiente, según la ecuación $b = -x_k \cdot a + y_k$. Los valores de " b " resultantes son aproximados en el eje b al valor permitido más cercano. Si una elección de a_p da lugar al valor b_q , hacemos: $A(p, q) := A(p, q) + 1$ (se incrementa de uno en uno el valor acumulador correspondiente). Así, al final del proceso, un valor de M en $A(i, j)$ corresponde a M puntos en el plano xy sobre la recta $y = a_i \cdot x + b_j$

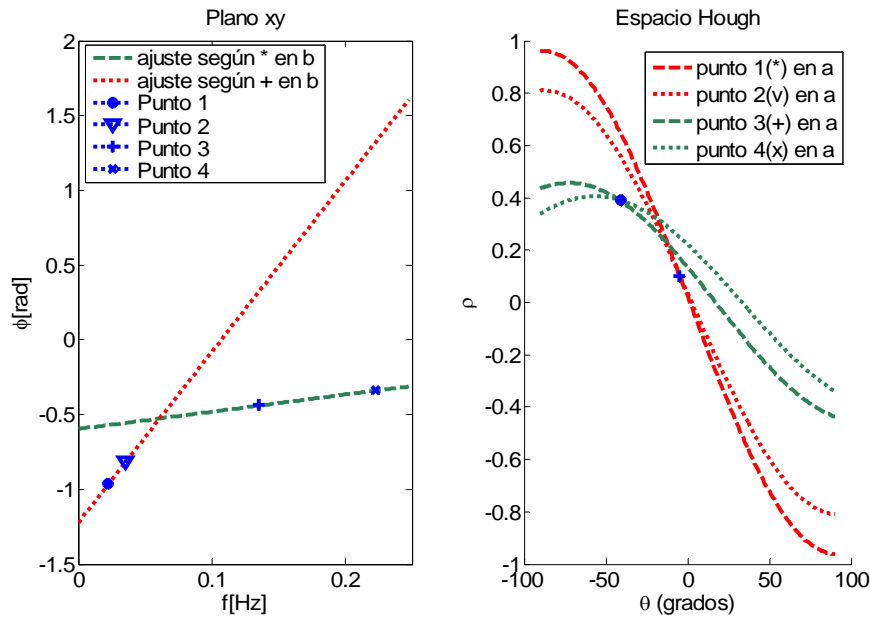


Figura E.2-2. a) Imagen original. Consiste en 4 puntos, dispuestos y enumerados según muestra la figura. b) Representación de cada uno de estos puntos en el plano (ρ, θ) . El rango de los valores de θ es $\pm 90^\circ$. Cada una de estas curvas tiene una forma sinusoidal diferente. Propiedad de detección de linealidad de la transformada: El punto + en b) representa la intersección de las curvas correspondientes a los puntos 1 y 2. La situación del punto + indica que estos puntos se disponen en línea recta orientada según un ángulo de 5° . El punto * en b) tiene correspondencia con la línea roja en a) de pendiente 41° .

La precisión en la linealidad de estos puntos se establece por el número de subdivisiones en el plano ab . Si subdividimos el eje a en k partes, entonces para cada punto (x_k, y_k) obtenemos k valores de " b " que corresponden a los k posibles valores de " a ". Dado que hay n puntos de imagen, esto implica $n \cdot k$ cálculos. Así, este procedimiento es lineal en " n ". El producto $n \cdot k$ no se acerca al número de operaciones discutido al principio de este apartado, a no ser que k sea similar o superior a n .

Un problema que surge con el uso de la ecuación $y=a \cdot x+b$ para representar una recta es que tanto la pendiente como el término independiente tienden a infinito cuando la recta tiene una posición cercana a la vertical. Una manera de solventar esta dificultad consiste en emplear la siguiente representación de una recta: $\rho=x \cos \theta+y \sin \theta$ como se presenta en la forma habitual de la transformada de Hough. El uso de esta representación en la construcción de una tabla de acumuladores es idéntico al método discutido anteriormente para la representación pendiente - término independiente. Lo que sucede ahora es que, en lugar de líneas rectas, tenemos curvas sinusoidales en el plano (ρ, θ) . Al igual que antes, M puntos de la recta $x \cos \theta+y \sin \theta=\rho$ darán lugar a M curvas sinusoidales que se cortan en el espacio paramétrico en (ρ, θ) , ver Figura E.2-2.

La transformada de Hough es aplicable a cualquier función de la forma $g(x, c)=0$, donde x es un vector de coordenadas y c es un vector de coeficientes. Por ejemplo, los puntos del círculo $(x-c_1)^2+(y-c_2)^2=c_3^2$ pueden detectarse usando el proceso comentado hasta ahora. La diferencia básica es que ahora tenemos 3 parámetros (c_1, c_2, c_3) , que se traduce en un espacio paramétrico tridimensional, con celdas cúbicas y acumuladoras de la forma $A(i, j, k)$. El procedimiento es el

siguiente: Incrementar c_1 y c_2 y resolver el valor de c_3 que satisface la anterior ecuación. Después, actualizar el acumulador correspondiente a la celda asociada al trío de valores (c_1, c_2, c_3) . Claramente, la complejidad de la transformada es fuertemente dependiente del número de coordenadas y coeficientes en una representación funcional dada. Por último, queda comentar que determinadas generalizaciones permiten detectar curvas con representaciones analíticas no simples.

E.3 La transformada Radon

La transformada Radon es una transformada integral cuya inversa es usada en la reconstrucción de imágenes. La transformada Radon (ρ, θ) de una función $f(x, y)$ se define como la integral a lo largo de una línea recta dada por su pendiente y su posición inicial. Existen numerosas expresiones para esta transformada pero las más populares usan la representación paramétrica de una recta de la forma $\rho = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta$, donde θ es el ángulo que de la línea respecto a los ejes y ρ es la distancia más corta al origen de la línea. De esta forma, se computan las proyecciones de una imagen en función de direcciones específicas tal y como se describe por la fórmula:

$$\begin{aligned} g(\rho, \theta) &= \iint f(x, y) \cdot \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(\rho \cos \theta - s \sin \theta, \rho \sin \theta + s \cos \theta) ds \end{aligned} \quad \text{E.2}$$

La transformada es capaz de convertir imágenes bidimensionales con líneas rectas de un dominio original a un dominio imagen de los posibles parámetros de las líneas de forma que cada línea del dominio original se representa por un pico posicionado en los valores correspondientes del dominio paramétrico. Así es de gran utilidad para la detección de líneas en aplicaciones de procesamiento de la imagen, visión computerizada, tomografía, etc... resultando efectiva aún en la transformación de imágenes ruidosas.

Modelando una línea con los parámetros (ρ^*, θ^*) , la E.2 se reescribe como:

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \delta(\rho^* - x \cos \theta^* - y \sin \theta^*) \Rightarrow \\ g(\rho, \theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\rho^* - (\rho \cos \theta - s \sin \theta) \cos \theta^* - (\rho \sin \theta + s \cos \theta) \sin \theta^*) ds \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\rho^* - \rho \cos(\theta - \theta^*) + s \sin(\theta - \theta^*)) ds = \frac{1}{|\sin(\theta - \theta^*)|} \end{aligned} \quad \text{E.3}$$

y, si $\theta = \theta^*$, entonces $\sin(\theta - \theta^*) = 0$ y se tiene que:

$$g(\rho, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\rho^* - \rho) ds = \begin{cases} 0, & \text{if } \rho^* \neq \rho \\ \int_{-\infty}^{\infty} \delta(0) ds, & \text{if } \rho^* = \rho \end{cases} \quad \text{E.4}$$

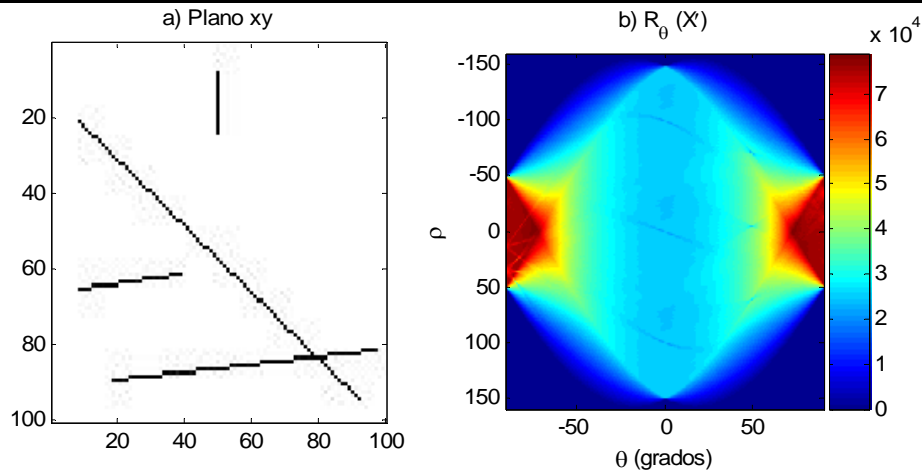


Figura E.3-1. Ejemplo del uso de la transformada Radon para la detección de líneas. En la imagen (a) se tiene la representación de varias líneas ruidosas cuyas transformadas se superponen en el espacio R de la imagen (b). Los picos observados en b) son correlacionados con las líneas de a) a través de la observación del ángulo (theta, θ) para cada caso. Igualmente, la coordenada rho en b) ofrece información acerca del origen ordenado y de cada línea en a)

El resultado es un pico formado en el espacio transformado en las coordenadas $\rho^* = \rho$ and $\theta = \theta^*$.

La Figura E.3-1 representa una ejemplificación del uso de la transformada Radon para la detección de líneas. En la Figura E.3-1b, la evaluación de los picos más fuertes (aquellos puntos en la imagen de mayor contraste y valor) ofrece información acerca del ángulo y localización de los segmentos rectos más largos de la figura de la izquierda.

Para una más detallada y precisa lectura acerca de la transformada Radon se invita a la consulta de la obra [Toft, 1996] (P. Toft, "*The Radon Transform - Theory and Implementation*", Ph.D. thesis - Department of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, June 1996, 326 pages.) disponible en la web.

F Equipamiento utilizado

A continuación se presentan algunos detalles de las facilidades disponibles y utilizadas para el desarrollo de este trabajo ordenadas por centro de investigación en el que se encuentran.

F.1 Laboratoire de Vision et Systèmes Numériques de l'Université Laval

Cámaras en el espectro infrarrojo



Santa Barbara Focal Plane SBF125

Matriz CCD
InSb (Antimonio de Indio)
Tamaño de imagen dinámico: desde 128x8 a 320x256.
Frecuencia de captura de imágenes/(tamaño de imagen) : 8 kHz/(128x8), 1 kHz/(128x128), y 400 Hz/(320x256).
Profundidad de bit: 14 bits (16,384 niveles)
Enfriamiento por nitrógeno líquido (77° K)
Banda espectral: 3 a 5 μ m.



Cincinnati Electronics

array FPA
InSb (Antimonio de Indio)
detector de 160x120 pixeles
Frecuencia de captura de imágenes: 54 images/s
NETD: 20 mK at 20°C
Profundidad de bit: 14 bits (16,384 niveles)
Enfriamiento por nitrógeno líquido (77° K)
Banda espectral: 3 a 5 μ m.

Fuentes de calor



2 flashes Balcar FX 60

Duración del pulso: 5 ms
Energía: 6,4 kJ x 2 flashes.



Lámparas de calentamiento

6 lámparas infrarrojas de 1.2 kW
Duración del pulso mínima: 300 ms

F.2 **Materials Research Centre de University of Bath** **Sistemas de inspección con termografía infrarroja**

- Modulo TSS:

Sistema dedicado, desarrollado en el Materials Research Centre de la University of Bath. Basado en la cámara miniatura Omega de Indigo y con un sistema de lámparas infrarrojas que proporciona una excitación pulsada de duración controlada.

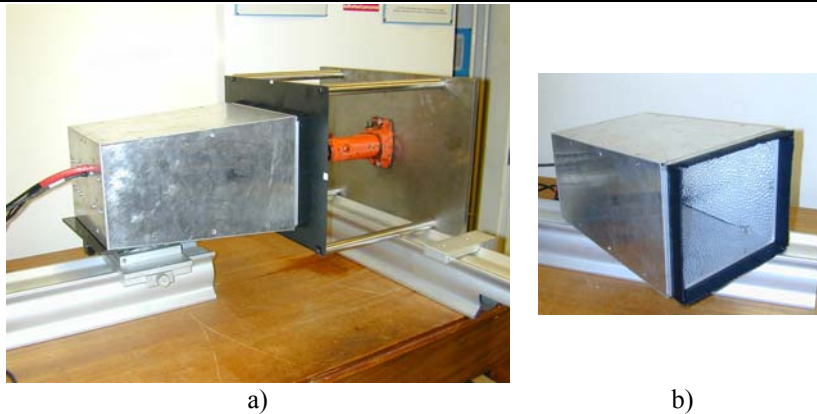


Figura F.2-1. Vistas del Módulo TSS desarrollado dentro del proyecto AHEAD por el Materials Research Centre de la University of Bath . a) sistema inspeccionando una placa de aluminio; b) sistema en reposo.



Omega

Rango de medida de temperatura del objeto	-40→150°C (con CAG hasta 400°C)
NEDT	<85mK
Tipo de detector	microbolómetro no refrigerado, tipo VOx de 160x120 píxeles
Banda espectral	7.5-13.5 μm
Salida de vídeo	Analógica RS-170A (CCIR)
Frecuencia de imágenes	30 Hz
Potencia consumida	<1.5W
Conectores	Interfaz RS-232
Rango de temperatura de operación	0→40 °C
Rango de temperatura opcional	-40→55 °C
Peso	<120 g
Dimensiones	34x36x48 mm

- Sistema termográfico comercial EchoTherm®:

Comercializado por TWI Inc. Basado en cámara de infrarrojo Merlin y en un sistema de flashes como excitación.



Figura F.2-2. Vista del sistema EchoTherm comercializado por TWI Inc.



Merlin

Proveedor: TWI Inc.

Manufactura: Indigo (US)

Sensor: FPA InSb

Tamaño de la imagen: 320 x 256 píxeles

NeTD: < 25 mK

Banda espectral: 1 - 5.4 μm

Profundidad de bit: 12-bit

Output: S-Video NTSC @ 30 Hz (PAL @ 25 Hz optional); Digital Video 60, 30*, 15* Hz (50 Hz PAL)

Frecuencia de muestreo de imágenes: 30Hz

(Analógico), Digital (60,30,15Hz)

Tamaño: 5.5 "H x 5.0 "W x 9.8 "L

Peso: 4.5 kg

F.3 Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria Cámaras de infrarrojo



ThermaCAM™ SC2000 (FLIR SYSTEMS)

Rango de medida de temperatura del objeto	-40→500°C (2 rangos) hasta 2000°C con la opción de alta temperatura
Precisión de las medidas	±2%
Sensibilidad térmica	<0.1°C
Campo de visión	24° x 18°/5 m
Tipo de detector	microbolómetro no refrigerado, tipo FPA de 320x240 píxeles
Banda espectral	7.5-13 μm
Salida de vídeo	VHS standard o S-VHS
Visor de imágenes	LCD color TFT de alta resolución
Almacenamiento	PCMCIA Flash Card de 100 Mbytes para imágenes en formato IMG en 14 bits o BMP 8 bits
Sistema de baterías	NiMH con autonomía de 2 horas
Zoom	Electrónico (x1-x4)
Conectores	Interfaz RS-232
Rango de temperatura de operación	-15→50 °C
Rango de temperatura de almacenaje	-40→70 °C
Peso	2.3 Kg incluyendo batería
Dimensiones	220x133x140 mm



Thermosensorik camera CMT 128 SM

Detector FPA	CMT (Antimonio de Indio)
Tamaño de imagen dinámico:	desde 32x32 a 128x128.
Frecuencia de captura de imágenes:	Variable hasta 4KHz en función del tamaño de imagen y el tiempo de integración (460 imágenes completas con 1ms de tiempo de integración)
Tiempo de integración:	1μs-2.5ms
NEDT <	25mK
Profundidad de bit:	14 bits (16,384 niveles)
Enfriamiento por	Stirling
Banda espectral extendida:	1.5 a 5 μm.

Calibrador de cuerpo negro



Mikron M330

Rango de temperatura	300 °C a 1700 °C
Exactitud	$\pm 0.25\%$ leyendo ± 1 °C
Resolución de temperatura	1 °C
Estabilidad	0.5 °C en periodo de 8 horas
No uniformidades de la fuente	± 0.1 °C
Cavidad:	Tubo de extremos cerrados
Diámetro	50 mm
Longitud	300 mm
Longitud calentada	150 mm
Diámetro de la abertura	25 mm
Emisividad	0.999 ± 0.0005
Método de control	Controlador PID Digital
Tiempo de calentamiento	80 minutos de ambiente a 1600 °C
Temperatura ambiente de operación	0 °C a 44 °C
Refrigeración	Por ventilador. Toma de aire en panel posterior
Requerimientos de potencia	220 VAC $\pm 10\%$. 3.6 KW máximo
Peso	80 Kg
Comunicación	Puerto serie RS422/485
Vida media del calibrador	5 a 10 años mínimo

PARTE 5

Summary

En esta parte se recoge un amplio resumen del documento de tesis escrito en una lengua oficial de la Unión Europea distinta al Español con la intención de optar a la mención de “Doctorado Europeo” respondiendo a una iniciativa del Comité de Enlace de las Conferencias de Rectores y Presidentes de Universidades de los países miembros de la Comunidad Europea que se concretó en marzo de 1993. Se efectúa en Inglés por su amplio uso en la comunidad científica.

Para obtener la mención de “Doctorado Europeo” se deberán cumplir los siguientes requisitos:

- a). La autorización de la defensa de la tesis doctoral deberá estar precedida de informes favorables realizados por un mínimo de dos expertos pertenecientes a instituciones de enseñanza superior de otros dos países europeos.
- b). Al menos un miembro del tribunal que juzgue la tesis deberá pertenecer a una institución de enseñanza superior de otro país europeo, sin que pueda haber coincidencia con el profesorado que ha realizado el informe previo previsto en el punto anterior.
- c). Que parte de la tesis doctoral, al menos el resumen y las conclusiones, se haya redactado y presentado en una de las lenguas oficiales de la Unión Europea distinta a alguna de las lenguas oficiales en España.
- d). El doctorando deberá acreditar que para la realización de la tesis doctoral ha realizado una estancia mínima de tres meses en otro país europeo.

In this part, a long summary is presented. It has been written in a official language of the European Union different to the Spanish in order to be awarded with the “European Doctorate” mention in accordance to the initiative of the Liaison Committee of the various national rectors’ or chancellors’ conferences from European universities concentered on march of 1993. The choosen language is English by its huge use among scientific community.

The mention referred to will be awarded to those PhD theses whose preparation and defence meet the following requirements:

- a). The authorisation to defend the PhD thesis will be preceded by favourable reports from a minimum of two experts from higher education institutions in two different European countries.
- b). At least one member of the PhD assessment board will be a member of a higher education institution from another European country. This member shall not be one of those who have issued the report referred to in the previous paragraph.
- c). Part of the PhD, at least the summary and the conclusions, will be carried out in one of the official language of the European Union different to any of the oficial languages in Spain.
- d). Doctoral students will prove that they have spent a minimum stay of three months in another European country in the preparation of their theses.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

PHD THESIS

CONTRIBUTIONS TO NON DESTRUCTIVE TECHNIQUES FOR EVALUATION AND TESTING OF PROCESSES AND MATERIALS BY MEANS OF INFRARED RADIATION

AUTHOR: DANIEL AQUILINO GONZÁLEZ FERNÁNDEZ

DIRECTOR: JOSÉ MIGUEL LÓPEZ HIGUERA

SANTANDER, 2006

S Summary

S	Summary	1
S.1	Introduction.....	3
S.1.1	Thermal energy, heat and temperature	3
S.1.2	Heat physics	4
S.1.3	Optical Methods to measure heat transfer and temperature	5
S.1.4	Scope of the Dissertation.....	6
S.1.5	Structure of the Document	7
S.2	State of the Art in Thermography	8
S.2.1	Situation and Tendencies.....	9
S.2.1.1	Hardware	11
S.2.1.2	Software	12
S.2.2	Lacks on the state of the art.....	12
S.2.2.1	Influence of low binarization on IT.....	12
S.2.2.2	Problems detected on usual methods.....	12
S.2.3	Objectives of the Dissertation	14
S.3	Subsurface defect detectability in Active Thermography Systems of low binarization.....	17
S.3.1	Parameters to define the detectability concept in Thermography.....	17
S.3.1.1	Factors affecting the temperature measurement in Thermography	18
S.3.1.2	Factors improving the detectability of subsurface defects in Thermography.....	18
S.3.2	Detection decision criteria.....	19
S.3.3	Detectability criteria for poor digitalizations.....	20
S.3.4	Compensation of poor digitalizations.....	21
S.3.5	Discussion of results.....	22
S.4	Automation of the thermographic sequence processing.....	23
S.4.1.1	Assessment of the acquisition times.....	24
S.4.1.2	Linear fitting	25
S.4.2	Statistical Methods	25
S.4.2.1	Interpolation algorithm.....	26
S.4.2.2	Statistical robust methods applied to Thermography	27
S.4.3	Transformation of the data space	28
S.4.3.1	Hough Transform.....	29
S.4.3.2	Radon Transform	31
S.4.4	Identification of linear behaviours.....	33
S.4.4.1	Phase behaviour	33
S.4.4.2	Electrical excitations	36
S.4.5	Discussion of results.....	38
S.5	Conclusions and Open Research Lines	41
S.6	List of publications.....	43

PART 1 Preliminary

This part introduces the Infrared Thermography (IT) and provides an overview of the State of the Art in Thermography that will be employed to show the motivation, scope and objectives of this dissertation as well as the structure of this document.

S.1 Introduction

Non Destructive Techniques for evaluation and testing of materials and manufactured components have been used for years. However, it is also true that they have experienced a huge development in the last decades due to their importance and efficiency as a tool in quality control processes. Past on the seventies, the inspections of an object or material to determinate if it was valid or not could be classified into Non Destructive Testing, NDT, and Non Destructive Inspection, NDI. But, due to the advance of these methods and the adding of new ones, quantitative analysis has been provided and so, a new branch of non-destructive techniques has been originated, i.e. Non Destructive Evaluation or NDE. Any detected anomaly can hence be classified by its size, shape, type and position.

NDE comprises many different techniques whose comparison is difficult (results are strongly dependent on the applications). Thus, the validation of each method depends on the acceptance among the scientific community and the adequacy of the tests to the calibration standards. In this way, Thermal Inspection is nowadays recognized as one of the more useful techniques for detection and evaluation of defects, leaks, metrology, structure characterization, mechanical and physical properties estimation or analysis under stress and strain of materials and components.

Particularly, the thermal inspection based on infrared radiance supplies fast, contactless and safe measurements. Its basic principle consists of the estimation of temperature differences in a surface versus time using infrared technology systems. Measured temperature is directly related to the heat transfer patterns of the inspected body and, therefore, not only superficial anomalies or imperfections can be detected but also subsuperficial ones.

S.1.1 Thermal energy, heat and temperature

As a starting point of the discussion, it can be said that matter, energy, space and time constitute the basis of all. Atoms and molecules compose matter and energy makes atoms and molecules jitter. Heat is a form of energy associated with the motion of atoms or molecules and capable of being transmitted through solid and fluid media by conduction, through fluid media by convection, and through empty space by radiation. But there exists a quantity of energy inherent to any kind of matter, even in the coldest vacuum. The average kinetic energy associated with the random motion of any substance is proportional to the absolute temperature of the substance. This energy is characteristic of the matter and its measurement is called temperature. Thermal energy is disordered energy.

Temperature is a measurement of this internal, disordered energy. While in ideal gases the disordered energy is all kinetic energy, in solids it is a combination of kinetic and potential energy.

Temperature is presented in a lot of facts in the world. It has influence on natural phenomena, industrial processes, labs, medicine, and so on. Its measure and control is frequent in those fields. Besides, there are only a few properties or characteristics of materials, which remain constant with temperature. Consequently, a great number of testing methods involve the measurement of temperature.

Additionally, thermometry characterizes matter as a function of its thermal behaviour, and it allows to perfectly distinguishing the correct behaviour from the anomalous one. For example, fever was the most frequently observed condition in early medical observations. From the early days of Hippocrates, physicians have recognised the importance of a raised temperature. During centuries, this remained a subjective skill, and the concept of temperature measurement was not developed until the 16th Century.

S.1.2 Heat physics

In Thermology, heat transfer is defined as the science whose objective is to predict the transfer of energy from one body to another as a result of a difference in temperature or a change in phase. Heat transfer is a complex process that can be described, in modern terms, by three main modes. The first is conduction, requiring contact between the object and the sensor. The second mode of heat transfer is convection, and the third radiation. All of them can now be imaged by remote detection methods.

Although these three mechanisms can simultaneously take place, it can be also possible the predominance of one of them upon the rest. Depending on the materials involved, heat factors may include conduction, convection (in gases and liquids) and/or radiation with different emphasis on the related components emissivity and absorptivity.

The atoms in a solid or fluid vibrate around their equilibrium positions. As they vibrate, they bump into their neighbours. In those collisions an energy exchange takes place. If the different regions of a solid object/fluid or of several solid objects/fluids arranged in contact with each other have the same temperature, then all atoms are just as likely to gain energy as to loose energy in the collisions. Their average random kinetic energy does not change. If, however, one region has a higher temperature than another one, then the atoms in the high temperature region will, on average, loose energy in the collisions, and the atoms in the low temperature region will, on average, gain energy. In this way heat flows through a solid/fluid by conduction, because a temperature gradient exist.

In some cases the contributions of convection and radiation play only a minor part in comparison to conduction. However, under some conditions, the effects of one or both can be very significant. Convection is the term used to describe the motion or, circulation current, which is set up in any gas or liquid as it is heated or cooled. Convection is not, in itself, a singular heat transport vehicle

as conduction and radiation are. Instead, it greatly increases conduction by constantly circulating colder material to the warm surfaces, thus increasing the effective temperature gradient.

Like conduction, radiation is a unique and independent form of heat transfer. Ignoring the conflicts of wave and quantum theory, it will suffice to say that radiation, in this case, refers to the transmission of electromagnetic energy through space. While the term radiation applies to the entire electromagnetic spectrum, our concern is with that portion which falls between visible light and radar, the infrared rays. Infrared rays are not by themselves "hot", but they are simply a particular frequency of pure electromagnetic energy. Sensible "heat" does not occur until these rays strike an object, thereby increasing the motion of its surface molecules. The heat then generated is spread to the interior of the object through conduction. Therefore, radiation is fundamentally different from conduction in describing the transfer of heat between two substances that are not in contact with each other. All matter above absolute zero radiate heat to some extent. Its temperature, the temperature of the surrounding environment and the object's emissivity factor, determines how much heat an object radiates.

Various authors gather the fundamentals and details of heat transfer in their bibliographies. Besides, several sophisticated numerical methods modelling the heat transfer are available. But this availability has not diminished the need for measurements and experimental quantitative and qualitative observations. They are still necessary for developing a comprehensive phenomenological understanding of the phenomena and for the validation of numerical models.

As the temperature is an essential magnitude and closely related to heat transfer, it is necessary to quantitatively observe or measure the temperature as precisely as possible in order to inspect, evaluate and test materials and control processes where heat transfer is fundamental.

S.1.3 Optical Methods to measure heat transfer and temperature

As it has been suggested, to be considered in previous sections, temperature measurement is highly valuable in many processes (physical, chemical, environmental, medical, mechanical...) and that can be concluded just considering the huge history of thermometry. From ancient times, several devices and systems have been developed to measure temperature and standardizations of the measurements have also been treated.

Generally speaking, temperature measurement devices (thermoscopes and thermometers) use to be based on the temperature gradient registered when the materials of the instrument are in contact with the object under inspection. Basically, the development of these artefacts carries out a previous thermal characterization of the used materials and substances.

Usually, the most suitable materials and substances are those with a linear thermal behaviour. When two bodies are put in contact, heat transfer is always directed from the higher to the lower temperature object until the thermal equilibrium between both is reached. So, the use of thermoscopes and

thermometers deals with an indirect contact measurement where the conduction is the primordial mechanism for the heat transfer.

However, contactless measurements can be performed by means of other heat transfer mechanisms, i.e. radiation. Optical methods are thus a good solution. It is extremely interesting in order to quantify the temperature of bodies in movement or even those that are so hot that could degrade the instrument of measurement. Besides, by using contactless testing and evaluation we are contributing to non-invasive methods.

Optical methods represent extremely versatile non-intrusive tools for visualizing in real-time temperature distributions over the whole field. Rapidly changing processes can be monitored, as there are practically no inertial errors. In general, optical measurements are of greater sensitivity and accuracy compared to other methods, such as calorimetric measurements or temperature measurements by thermocouples. Most of these methods are based on physical principles known a long time ago and their use has been mainly qualitative.

Optical techniques can be broadly classified in accordance to four basic principles: thermal radiation; light scattering from tracer particles; interaction of fluid flow with a solid surface, and methods relying on refractive index changes in the fluid. Techniques in the last category can be further subdivided into two groups: interference methods, based on difference in optical paths and methods using light deflection. Other traditional classification divides the different techniques in terms of the spectral region in which they work.

Recent development and commerce of lasers, cameras and processing systems with appropriated software have stimulated a renaissance of techniques and an expansion of the quantitative analysis possibilities. Nowadays, optical methods involve in thermometry are pyrometry and thermography.

Pyrometry and thermography (thermal imaging) offer the potential to measure and control the temperature of an object, performed by measuring the emitted thermal radiation. In particular, these thermal inspection techniques can be fruitfully employed to measure heat fluxes, in both steady and transient techniques. In the traditional technique of pyrometry, temperature is measured at a single point, or the space-averaged one. This constraint makes experimental measurements particularly troublesome whenever temperature, and/or heat flux, fields exhibit spatial variations. Thermography allows the performance of accurate measurement of surface temperature maps even in the presence of relatively high spatial temperature variations. Therefore, much more information can be supplied using thermography instead of pyrometry: not only the precise temperature values but also spatial distribution of them.

S.1.4 Scope of the Dissertation

Nowadays, nobody underestimates the importance of quality as a main factor in the management of any process or product. This is a strongly heterogenic word which stands for the measurement of conformance of a product or service to certain specifications or standards, a distinctive element, a level of superiority

that is usually high, a degree of excellence or that it is exceptionally good within its kind.

As mentioned before, temperature or heat transfer measurement and control is essential in a lot of processes and, besides, characterizes components, products and structures. It is directly related to the manufacturing and the implementation of a quality control and, therefore, it could lead to the necessity of establishing thermal inspection techniques. The study and analysis of these techniques have become the first goal of the works here presented.

Infrared thermography (IT) transforms the thermal energy, emitted by objects in the infrared band of the electromagnetic spectrum, into a visible image. This feature represents a great potentiality to be exploited in many fields. The search and identification of niches (industrial and market ones) where it is possible to contribute with the use of IT becomes another goal in our work. Mainly, quality control of manufactured products, evaluation of components and structures and monitoring of industrial processes conform the axis of the works here presented.

Finally, offering solutions to the inconveniences found in the niches mentioned above requires understanding, analyzing, processing and solving different facts related to heat transfer problems, precise measurement of the temperature and data and image processing. The final goal is to develop processing tools that allow any operator to perform a thermographic inspection.

S.1.5 Structure of the Document

This document has been organized in four parts, each one dealing with an essential block in the dissertation.

The first part reviews the preliminaries of the thesis. In order to provide a brief overview of the basic technology that will be employed along the work, the first chapter, Introduction, relates the thermal inspection to daily life and the second one, i.e. State of the Art in Thermography, outlines the state of the art and the trends of this field.

The second part, Contributions, details the principal contributions performed on IT by the author. Taking as common application in the research the detection of subsurface defects in materials, chapter 3, i.e. Subsurface defect detectability in Active Thermography Systems with poor digitalization, describes how the detectability can be enhanced and overcome poor digitalization on thermographic systems. Chapter 4, Automation of the thermographic sequence processing, is focused on the automation of the decision processes necessary to subsurface defect detection as mentioned above. Removing in some cases the human intervention and leading to possible automatic quality control software for inspection of composites and materials demonstrate efficiency.

The main conclusions and open research lines are summarized in the third part or chapter 5. In addition, different appendixes are added to the work at the end presenting aspects of interest, technical characteristics of the used

equipment, algorithms and a list with all the contributions of the author to the scientific knowledge.

S.2 State of the Art in Thermography

The previous section has been an invitation to a meditation. Temperature measurement is directly related to manufacturing processes and evaluation of materials, structures and devices. The ability of determining this measurement in a contactless way avoids the intrusion and possible alteration or destruction of the sample under inspection. The ability of obtaining thermograms (thermal images) allows observing the heat transfer mechanism bi-dimensionally, providing much more information than conventional single-point measurement techniques. The ability of adding the possibility of an analysis and temporal record of those thermal images leads to a better control and understanding of the processes and objects under inspection.

In this point, Infrared Thermography (IT) is positioned as a serious, reliable and precise alternative in the Non Destructive Inspection, Testing and Evaluation (NDI, NDT and NDE) fields. It is recognized as one of the principal NDE&T techniques among others as Radiographic Testing (RT), Ultrasonic Testing (UT), Electromagnetic Testing (ET), Magnetic Particle Testing (MT), Dye Penetrant Testing (PT), Visual Testing (VT), Acoustic Testing (AT) or Leak Testing (LT).

Each NDE&T technique has its proper advantages and disadvantages. Those belonging to IT are synthesized in next table:

Advantages	<ul style="list-style-type: none"> • fast inspection rate • no contact • safety (there is no harmful radiation involved) • results are relatively easy to interpret (provides images) • wide range of applications; unique inspection tool for some niches
Difficulties	<ul style="list-style-type: none"> • difficulty in obtaining a quick, uniform and highly energetic thermal stimulation (active thermography) • effects of thermal losses (convection, radiation and conduction) • limited capability of detecting only defects resulting in a measurable change of thermal properties • ability to inspect a limited thickness of material under the surface • emissivity problems

Table 1. Advantages and difficulties of IR thermography

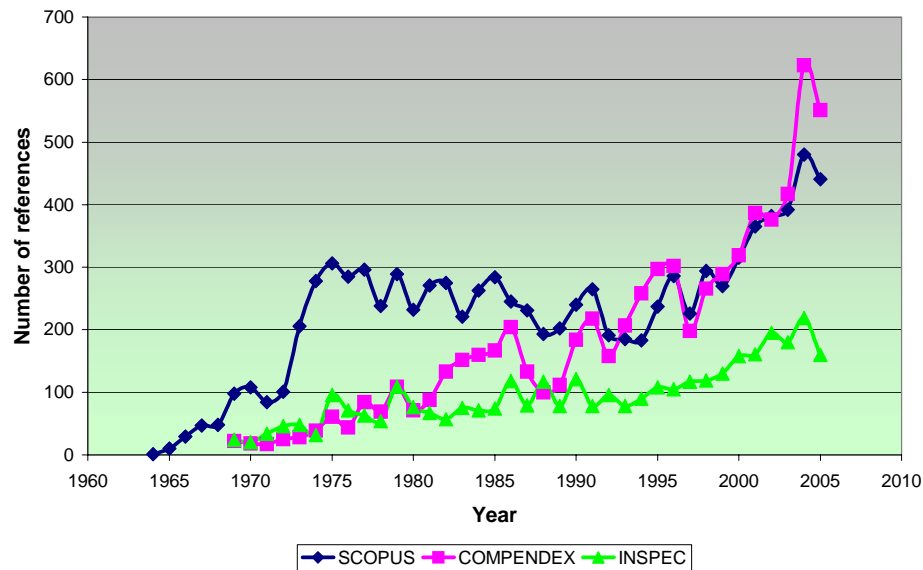


Figure S.- 1 Identification of any of the terms: thermograph*, thermal imaging or infrared testing in the contents of different databases sort by the year of publication.

S.2.1 Situation and Tendencies

The improvement and sophistication of infrared cameras, the rise of computing power and the improvement of software used in the analysis of thermographic sequences has inspired to recognize new niches where IT becomes useful. It has been clearly reflected in the boom of conferences and publications regarding thermographic topics.

International conferences as Thermosense in America (annual, XXVIII meeting in 2006) and QIRT (bi-annual, 8th meeting in 2006) in Europe are specific conferences with the scope focused on the scientific, industrial and general uses of temperature measurement and thermal imaging. Other conferences, with wide scope towards NDE&T, are: the NDT Conference (annual British conference, 45th meeting in 2006) and ECNDT (9th meeting in 2006, each four years) in Europe and the worldwide WCNDT (each four years, 7th edition in 2004). There are also workshops as the IWASPNDE in Québec (5th edition in 2005) and AITA (bi-annual, 8th in 2005) in Italy. All these meetings are clear examples of the acquired relevance and diffusion of thermography in our days.

Several publications collect in their volumes the advances of the IT technology. Supported by different associations (ASNT-Materials Evaluation, BINDT-Insight, QIRT-Qirt Journal, IEEE, SPIE...), their scope remains in the fields of material characterization (Research Non-destructive Evaluation, NDT&E International...), and optics and applied physics (Infrared Physics and Technology, Optical Engineering, Advanced Physics, Optics and Laser Technologies...).

After a poll on Scopus, Inspec and Compendex databases looking for several terms associated with IT (thermograph*, thermal imaging, infrared testing) some conclusions can be extracted about the tendencies of the IT technology. In Figure S.- 1 can be clearly observed the bullish tendency of

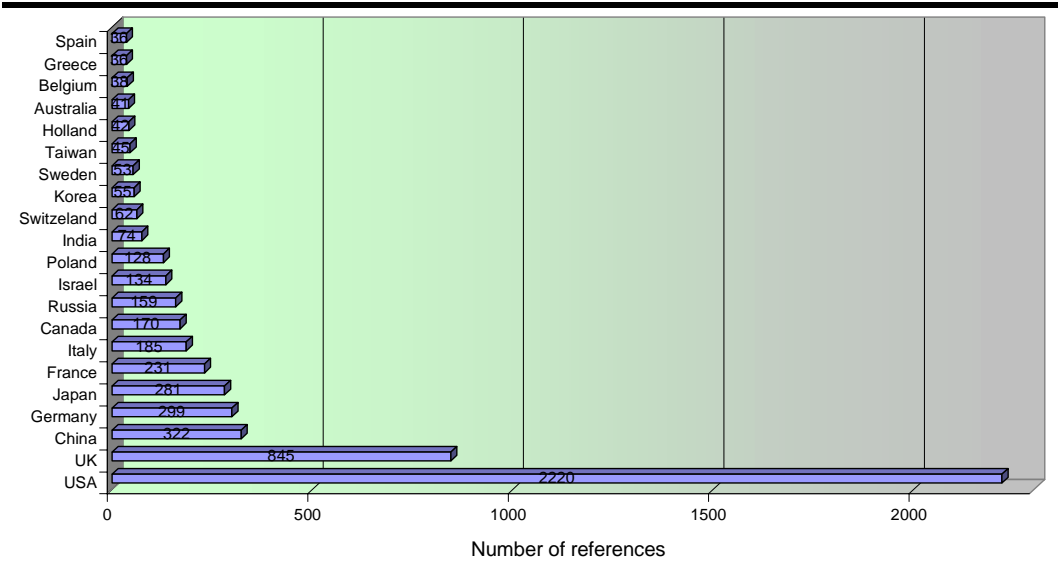


Figure S.- 2 Identification of any of the terms: thermograph*, thermal imaging or infrared testing in the contents of different databases (Inspec and Compendex since 1969) sort by the country of publication. Anglo-Saxon world dominates the scene.

publications related to IT during the last years. The data regarding in 2005 does not collect the results for the whole year.

Other interesting graph is the one shown in Figure S.- 2, where the contribution of the terms above to the Inspec and Compendex databases is sorted by the country of the first author. Without any doubt, USA is the country with more contributions reaching a share of 30.4% over 7034 publications since 1969. The second country is UK with a 11.6%; being China and Germany the third and fourth countries with a 4.4% and a 4.1% respectively. These four countries represent more than half of the contributions in this field. Spain remains in a inconspicuous 21st place with a share of 0.5% behind countries like Greece, Belgium, Holland and Sweden, with less population and belonging to the same political environment (European Union).

Concerning the poll in terms of editors, four huge entities are investigated: AIP, SPIE, Elsevier and IEEE. During the last five years, the online resources of these entities show a similar tendency for all of them, as shown in Figure S.- 3. It has to be mentioned that the time inverted for a publication in a peer-reviewed process depends on several factors, which vary from one editor to another. Elsevier is getting a stronger position in the last years because of its increment in the number of publications, the speed up of its submission process, correction and acceptance processes (using web technologies) and the exemption of submission costs.

In an attempt to classify the different contributions detected, the topics division of the international conferences is taken as a reference. Conferences selected are a good example of the latest developments and researches (publication quickness) and enough scientific acknowledgment. So, topics from Thermosense and QIRT conferences in the last five years are blended, counted and shown in Figure S.- 4. Over a total of 377 papers, NDT is the richest topic regarding contributions including the evaluation of samples, impact damages,

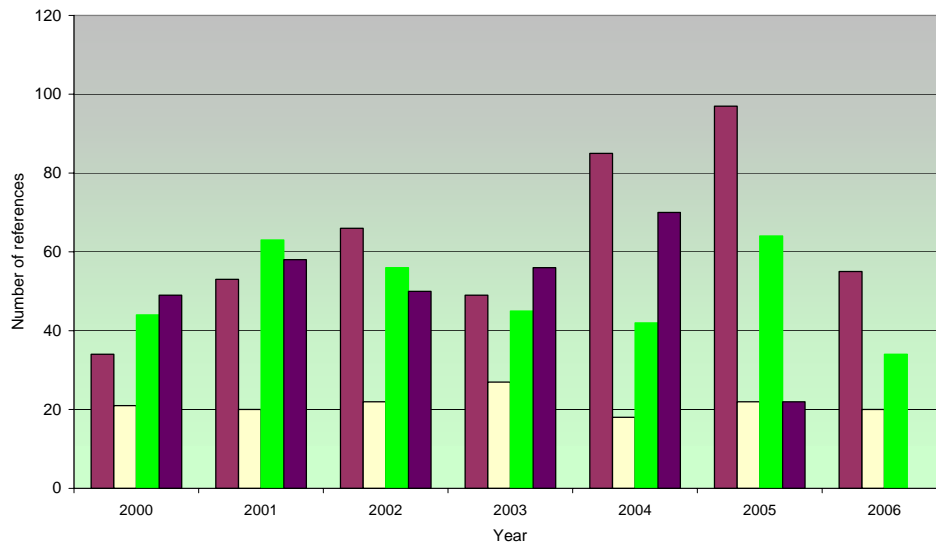


Figure S.- 3 Contributions collected by different entities related with IT technologies and sort by the year of publication.

leaks and other inspections. Solid and fluid mechanics is a usual topic in the QIRT conference counting with studies on thermo physical properties, modelling of heat transfer, semiconductors and so on. In addition, worldwide events influence this study. Columbia's disaster in 2003 and SARS disease in 2004 provoke that, in following conferences, these subjects were studied and broadly presented by the international scientific community.

S.2.1.1 Hardware

A big variety of products has been commercially developed in the last decades. IT was a military technology at the end of the XX century but, nowadays, it is a common tool in numerous civil applications. This fact contributes to the development of new cameras (compact, lighter, quicker and cheaper devices, even working simultaneously in several wavelength ranges) and new excitement sources (powerful and with more features). Besides, computer capacity and software development also improve the features of the present thermographic systems, opening new application niches and characterizing more precisely the

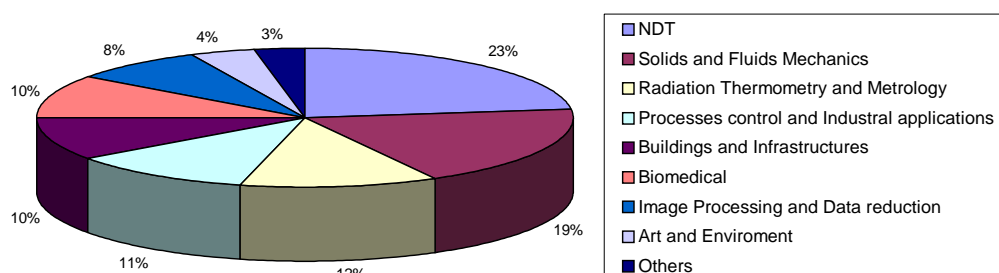


Figure S.- 4 Percentage of contributions distributed by topics extracted from Thermosense (2004, 2005 and 2006) and Qirt (2004 and 2005) conferences.

already known niches. Many brochures can be consulted.

S.2.1.2 Software

Software used in IT inspections groups a high number of functions defined for processing of images, save and load of thermographic sequences, comparison tools and even quantitative analysis. Usually, proprietary software includes specialized procedures to control other hardware associated like, for example, excitement sources (heating sources, vibration sources...).

However, the development of other software is also interesting for IT practitioners. Quantitative analysis is each day more and more demanded, and so proprietary software includes each day new functions that facilitate data transformations (e.g., Fourier Transform) or the modelling of the experimental setup. The numerical capabilities offered by finite element modelling (FEM) were once limited to structural analysis, but it has been shown in several studies that 3D finite element modelling of the pulse thermographic technique considers aspects of thermal modelling that go unaccounted when compared to 1D and/or 2D numerical methods.

S.2.2 Lacks on the state of the art

S.2.2.1 Influence of low binarization on IT

Removed from the present state of the art of thermographic systems, the low binarization of digital outputs carries effects on the temperature resolution. In some cases, this reduction is even more important than the very NEDT value. This is due to the fact that the binarization is equivalent to a specific dynamic range. The full range of temperatures in a scene can avoid precise temperature measurements even when thermal contrast is higher than the NEDT value. The next equation denotes such affirmation.

$$\text{Dynamic range} = 2^{\text{binarization bits}} \left(\frac{\text{NEDT}}{\text{digital levels}_{\text{NEDT}}} \right) \quad \text{ec. S.1}$$

This low binarization introduces difficulties on the detection capability of thermographic systems. However, as detectability of subsurface defects can be improved by adding higher excitations, there is a way to compensate this negative influence.

S.2.2.2 Problems detected on usual methods

Raw thermograms from typical active thermography tests are rarely adequate as acquired for quantitative analysis. Processing is a mandatory step prior to defect detection and/or characterization. A wide variety of methods from the field of machine vision and signal processing have been specifically adapted for IT applications. However, in our goal to develop an automatic procedure that removes the human subjectivity of the process, not all the available techniques are suitable.

A wide variety of transformation algorithms can be applied to thermographic pulsed data to analyze the information in an alternative space.

Signal transformation is used with the purpose of finding an alternative domain where data analysis is more straightforward. The Fourier transform (FT) constitutes without a doubt the most commonly used transform in signal processing. The FT uses sinusoids as basis functions to decompose the signal from the temperature time space to a phase or amplitude-frequency space. The phase has proved to be very useful, not only for qualitative but also for quantitative analysis.

Although the use of oscillatory waves is very convenient in order to extract amplitude and phase delay information, it may not be the optimal choice to correctly represent transient signals (as the temperature profiles typically found in pulsed thermography). The use of waves of limited duration, or wavelets, constitutes an interesting alternative. Efforts are focused on an optimal selection of the mother wavelet in order to increase time resolution at early stages.

Human intervention in these algorithms is high. An adequate time resolution Δt and truncation window size $w(t)$, should be selected during the signal discretization process. Furthermore, these sampling and truncation parameters are both function of the depth of the defect and of the thermal properties of the specimen/defect system. Only experienced operators can exploit the benefits of these techniques. Subjectivity in the determination of these parameters is to be found.

Instead of defining a basis function, another possibility is to use statistical modes to discriminate spatial and temporal information. Principal component thermography (PCT) also exploits the decomposition of the time-varying temperature signal using "more appropriate" functions than the oscillatory ones obtained through Singular Value Decomposition (SVD). Singular value decomposition provides a compact representation of data by sorting the spatial information as a set of empirical orthogonal functions (EOFs) and time information as a set of principal components (PCs). However, quantitative analysis is really hard to obtain from the PCs.

Normalization is a processing technique where the sum (average) of the total images to be processed is divided by the averaged set of images where the zone of interest (e.g. a subsurface defect) is observed in the temperature data. An obvious difficulty is to find those relevant images!

Thermographic signal reconstruction (TSR) is an attractive technique that allows increasing spatial and temporal resolution of a sequence, reducing the amount of data to be manipulated at the same time. TSR is based on the assumption that temperature profiles for non-defective pixels should follow the decay curve given by the one-dimensional solution of the Fourier Equation. Researchers thus proposed to fit the temperature decay curve in PT since it varies (in a first approximation) as $t^{1/2}$. Using logarithms, this yields to a straight line of slope $-1/2$. Afterwards, a n -degree polynomial is fitted for each pixel within the field of view and a temperature "reconstruction" is provided. Such synthetic data processing brings interesting advantages such as: significant noise reduction, possibility for analytical computations (such as the PPT), and considerably less

storage required since the whole data set is reduced to n images (one per coefficient). In addition to raw temperatures that can be reconstructed in TSR, it has been shown that first and second time derivative are efficient at defect detection. Considered as one of the essential tools for quantitative analysis, its principal inconvenient is the perfect synchronization between the heating source and the capture system. Prior instants contain most of the information of shallower defects. The heating pulse arrival time estimation should be controlled to avoid mismatches in the reconstruction. Nowadays, special care is taken in the pulse-descending flank. Its effects are retrieved by controllers and even modelling.

Finally, various thermal contrast definitions exist, but they all share the need of a known sound area, i.e. a non-defective region within the field of view. Among thermogram processing techniques, thermal contrast is often employed for enhancing subsurface defects detection, image quality and even for obtaining some quantitative approximations regarding the depth, thermal properties and size of defects. The different contrast definitions require the identification of a non-defective zone or sound area or, even better, the cold image, and this is often a limitation because it demands a priori knowledge of the specimen. The definition of the sound area becomes a critical issue and, because it will always be an assumption, this is a strong limitation that provides inaccuracy to contrast methods. Some attempts have been proposed for avoiding this necessity of the sound area knowledge and, moreover, overcoming other problems such as the non-uniformity of the thermal stimulation or the tilt of the heat pulse source to the normal of the specimen surface. Among these, the Differentiated Absolute Contrast (DAC) method is one of the simplest and easiest to implement. However, the experience of an operator working in this field is still necessary to obtain satisfactory results and clear contrast images.

S.2.3 Objectives of the Dissertation

Within reference frame, this Dissertation aims at making an assessment and improvement of Infrared Thermography capabilities. The objectives can be mainly grouped as:

- Improvements of subsurface defect detection by means of low binarization systems.
- Automation of processes involved in thermographic sequence analysis.

Taking into account the observed tendencies in the IT field, the development of the hardware features, their versatility and diversity, it is also convenient to establish some parameters able to precisely compare different thermographic systems. This goal is a partial objective included in chapter 3.

On the other hand, the dissertation deals in depth with the assessment of software algorithms, which are able to automate the decision tasks of defect detection. The main goal of this thesis work is to propose and demonstrate the efficiency in the use of new software tools with capability to simplify the detection of subsurface defects. As stated along the text and extracted from the review of the State of the Art of the available thermographic software, present

detection processes need high qualified human intervention. Operators have to be experienced in the use of image processing tools and heat transfer modelling to analyze a thermographic sequence. Entities such as ASNT or FLIR develop different programs in order to provide Certification Levels to operators as their knowledge increases. Even though wide diversity of contents will be dealt with, this thesis is specially focused on those aspects, which have been identified as resolvable human decisions. The purpose of these works has been the development of algorithms, which, as automatically as possible, reproduce the human decisions and provide a unique image where all the detectable defects are presented.

Part 2 Contributions

S.3 Subsurface defect detectability in Active Thermography Systems of low binarization

The most important condition for IT to provide useful results is the existence of a temperature difference, or thermal contrast ΔT , between the feature of interest and its surroundings. A second condition is to have the appropriate thermal imaging equipment able to detect those thermal contrasts and to produce thermal images or thermograms. In addition, it is also necessary to count with an experienced thermographer to interpret the thermographic results.

In this chapter the detectability concept is introduced and analysed. Several factors increase or decrease the thermal contrast produced by an anomaly. Our goal is to identify the procedure, and then to compensate the poor digitalization of the thermographic captures. Studies have been set in the detection of subsurface defects as this ability to predict subsurface defect information in composite materials through a non-invasive, efficient inspection protocol is fast becoming a vital research area.

S.3.1 Parameters to define the detectability concept in Thermography

The concept of detectability used in this study, defined as the availability of detecting defects, is based on the minimum detectable size, MDS, and the noise equivalent temperature difference, NETD.

When the feature of interest presents a size bigger than the MDS parameter, the temperature of that feature can be determined from the emitted radiance. However, if the object is smaller than the MDS, its shape and temperature are not discerned as the surroundings radiance is also captured. On the other hand, the NETD parameter is directly related to the thermal sensitivity of the IR camera, the thermal resolution or lower thermal difference that can be measured. It is clearly seen that the thermal contrast for detection must be bigger than the noise equivalent temperature difference (NETD) parameter provided usually by manufacturers. If the absolute contrast goes below the thermal sensitivity, it is impossible to know if it is a defect or not. Therefore, both conditions should be considered for defect detections.

There exists a parameter that involves the two concepts mentioned above. Minimum resolvable temperature difference, MRTD, characterizes the detectors and thermal inspection systems as the minimum thermal contrast that can be discerned in a scene with a bar pattern of different width on a uniform background. At low spatial frequencies, the thermal sensitivity defined by the NETD parameter remains the more important, whilst for higher frequencies the dominant parameter is the MRS. MRTD combines both conditions using the modulation transfer function, MTF, which considers the spatial effects of the used optics and the characteristic parameters of the detector.

S.3.1.1 Factors affecting the temperature measurement in Thermography

Different factors affect the precision of the temperature measurement in Thermography. Noise factors are important, but not the only ones affecting the measurement. Variations on emissivity, reflections or even the degradation of the sensing equipment, regarding its optics and its electronic parts, produce fakes and erroneous values of temperatures in the thermograms.

The effects of these factors can be corrected via software and calibrations. Blackpainting and other conditioning of samples help to reduce the imprecision in measuring the specimen's temperature. However, special care should be taken in avoiding the alteration of the object under inspection.

S.3.1.2 Factors improving the detectability of subsurface defects in Thermography

Thanks to the heat transfer mechanism and its modelling, it is possible to establish a relationship between the surface temperature variations of a specimen with the presence of an internal or subsurface defect. Thermal waves generated under the surface are reflected in any internal anomaly, and this fact is shown in the surface. To improve the detectability, more energetic thermal waves should be generated.

It has been already mentioned that different excitations can increase the thermal contrast of subsurface defects due to the extra energy supplied. How this energy is released leads to different thermographic techniques that can be suitable for a specific kind of defects. In this point the use of "direct problem" software, which models the different heating conditions, is highly valuable. For example, ThermoCalc software developed by the IR Thermography Laboratory of the Tomsk Polytechnic University of Russia is a useful tool that involves defects in multilayer solids with arbitrary excitations and uneven heating patterns. Figure S.- 5 shows the temperature increase of the surface of a CFRP specimen under different excitations: a flash excitation and two excitations using a lower power pulse for a longer duration.

As explained in the previous section, it is clear that the energy is released at different times and therefore the initial conditions for the cooling process analysis are different (the initial temperatures for each cooling process are different and, in order to perform a comparison, normalization should be carried out). A larger contrast is obtained with long-duration pulse excitations although a lower temperature rise on the surface is obtained due to the lower power of the heating source. Defects are more easily detected as the differences between defective and non-defective areas are more evident, even during the heating process, using long-pulse heating.

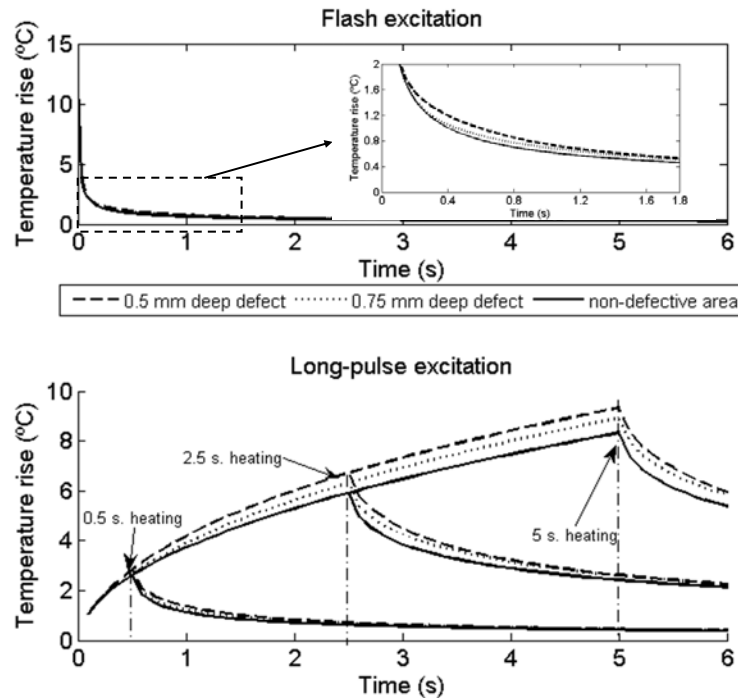


Figure S.- 5 Simulated surface temperature evolution with 100KW/m^2 flash excitation (upper figure) and 3KW/m^2 long-pulse excitation for 0.5, 2.5 and 5s duration (lower figure). Temperature evolutions correspond to 2mm diameter defects and a sound area (solid curve). ThermoCalc-3DTM software has been used to simulate the different excitation conditions for several defective samples.

S.3.2 Detection decision criteria

Detection criterion is usually considered in terms of the signal to noise, SNR, ratio, when the thermal contrast is high enough compared with the noise level. The following equation establishes this relation:

$$SNR_{\max} = \frac{\Delta T_m(t)}{K \sigma_{\text{sound}}(t)} \Big|_{t_{mp}} = \frac{\Delta T}{K \cdot \Delta T_{\text{res}}} = \frac{\Delta T}{K \cdot NETD} \quad \text{ec. S.2}$$

where σ_{sound} is the temperature standard deviation in a sound area, K is a verdict parameter to support the decision and ΔT_{res} is the thermal resolution given by the detector. Therefore, just by regarding the thermal contrast, referred to the absolute contrast definition, it is possible to distinguish sound areas and defective areas in a thermogram. Discussion is to be found in the determination of the optimum observation time.

However, as introduced above, not only the NETD through the SNR ratio has to be considered as the decision value. MRTD should be also taken into account and later the binarization effect. Generally, the whole image captured by a camera covers the range of temperatures of the background as well as the sound area and the defect temperatures in the sample. Some cameras have an automatic gain control (AGC), which acts to adapt the output signal of the detector and then the quantification is realised. The AD conversion algorithm automatically adjusts, frame by frame, to maximize the contrast in darker (colder) parts of the frame, while trying to avoid blanking of brighter (hotter)

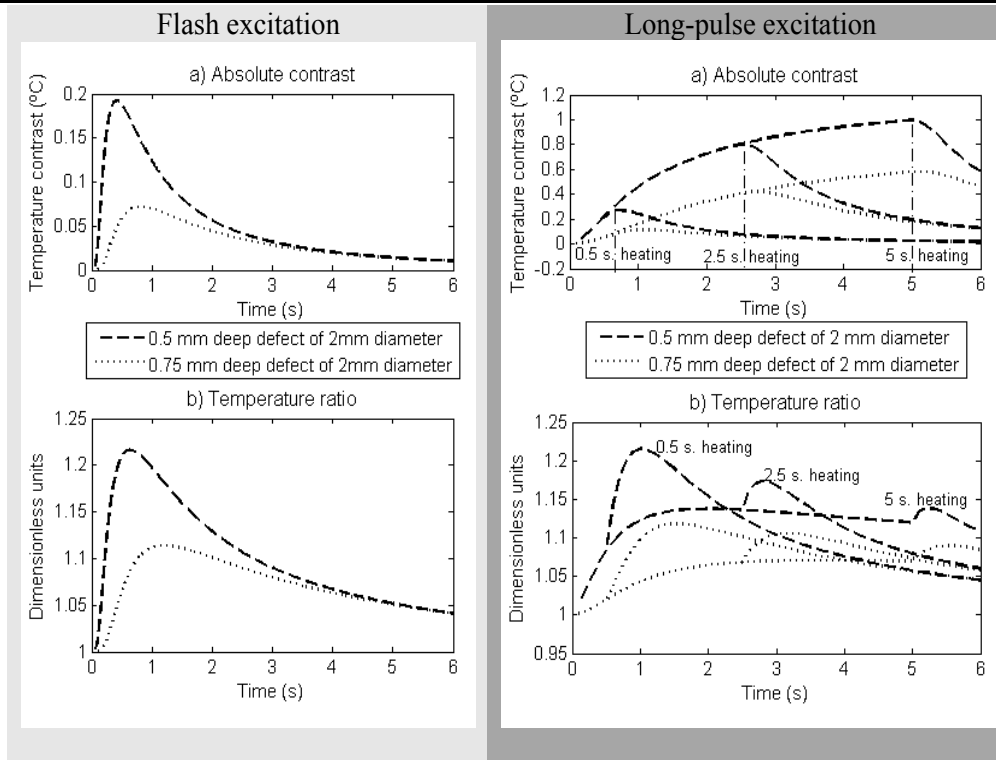


Figure S.- 6 a) Absolute and b) temperature ratio for two defects (darker one shallower than lighter one) under long-pulse excitations of 0.5, 2.5 and 5 sc (darker background, right-handed) and under a flash (lighter background, left-handed).

objects in the image frame. In that sense, the temperature ratio between a defect and a sound area should be therefore limited.

The temperature ratio is represented in Figure S.- 6 and it is defined, after some easy derivations, as the ratio between the temperature rise on the surface above the centre of the defect and the temperature rise at a region remote from the defect. Temperature ratio and the absolute contrast should be enough to determine a decision criterion applicable to any kind of camera.

Thus, the detectability could be estimated applying both criteria, the absolute contrast and the temperature ratio, and guaranteeing that both contrasts are bigger than a certain value.

S.3.3 Detectability criteria for poor digitalizations

The aim is to establish a detectability of defect criterion, which takes into account the effect of a low binarization. Finite difference modelling has been used to simulate the long pulse excitation technique and to make comparisons with the more widely used short pulse (typically 2ms) excitation technique. ThermoCalc-3D software has been used to simulate the different excitation conditions for several defective samples. The performance in defect detection of a poor digitalization (or low binarization) has been evaluated using carbon fibre reinforced plastic (CFRP) test pieces containing a range of defects of different diameters and at different depths.

A detectability criterion is then defined as a combination of two conditions. The thermal contrast should be higher than the NEDT value and,

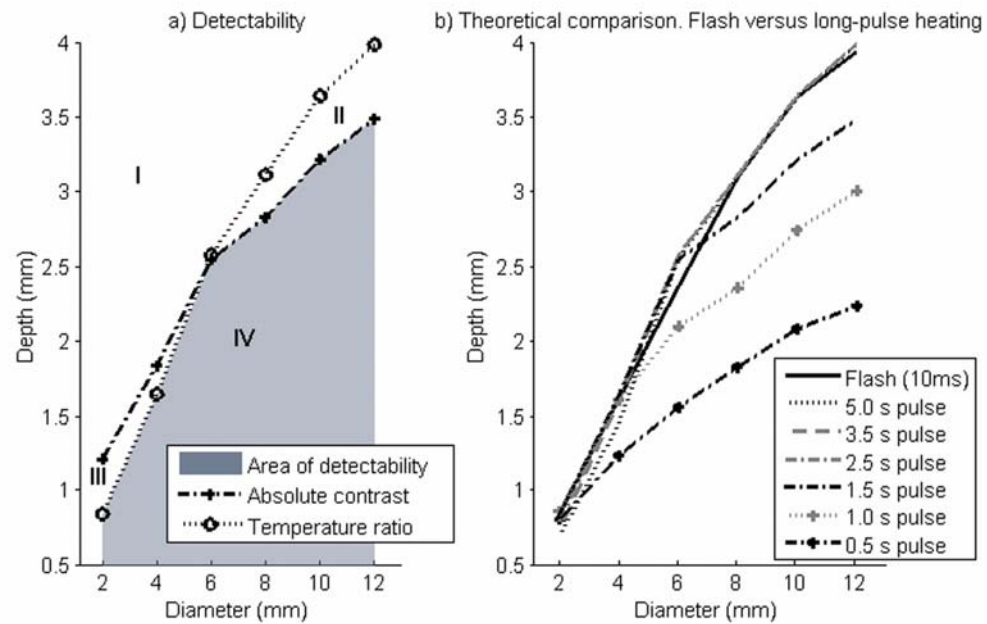


Figure S.- 7 a) Definition of area of Detectability. b) Depth versus diameter diagram limiting the detectability for long-pulse and a flash heating.

besides, also bigger to binarization resolution imposed by the full range of temperatures in the scene. Due to the fact that two conditions are needed, the best way to represent the detectability concept is a bidimensional graph. It is performed for the full set of simulated defects.

Four areas are clearly distinguished in Figure S.- 7a. In each area a different combination of values for the two contrasts can be found. In area I, for deeper and smaller defects, the absolute contrast is below the thermal sensitivity and the temperature ratio is not large enough; therefore no defects in this area can be detected. In area II, pixels on a thermogram have an absolute contrast difference less than an established NEDT value, although their temperature ratio is greater than the established relative contrast (temperature ratio value). An example could be two pixels, one adjacent to the other, belonging to a noisy cold sound area. Area III applies to a "hot" sound area. Two adjacent pixels may have an absolute contrast greater than NEDT but they are not detectable when the range of temperatures covered in the quantification process are all high and the difference between the maximum and minimum values is small; the noise equivalent levels will correspond to a higher temperature and therefore limit the minimum detectable temperature difference. Finally, in area IV the absolute contrast and the temperature ratio are both sufficiently large and so it is possible to detect the temperature difference associated with a defect.

S.3.4 Compensation of poor digitalizations

Compensation of the poor digitalization is expected as a result of the above mentioned. Using long pulse thermography, more energy can be released for specimen heating. Figure S.- 7b shows the detectability graphs for a flash (without binarization effect) and several long-pulse excitations of different durations and with a poor digitalization effect. The detectability reached for

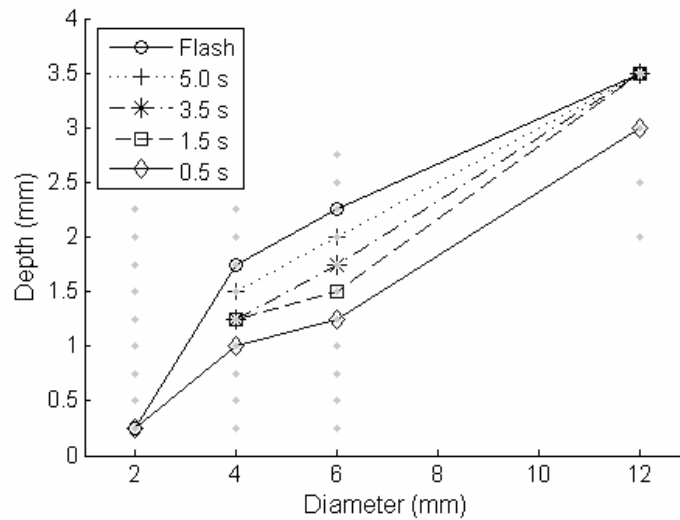


Figure S.- 8 Depth vs. diameter diagram for a flash excitation and long-pulse excitations. Small gray points reveal the combination of depth/diameter values that were tested.

heating times longer than 2.5s is comparable to the detectability for a flash excitation for most of the defects. However, the detectability of smaller defects is reduced as the heating time increases.

S.3.5 Discussion of results

Using long-pulse excitations, cameras with a low binarization can detect subsurface defects in the same way that other more sensible and precise systems. The increase of released energy compensates the deficiency on detectability of these cameras.

As a validation, several exhaustive works have been done with two systems. On one hand, the commercial TWI Inc.'s ThermoScope short pulse excitation system was taken into consideration. On the other hand, a low-cost system developed by using a miniature ThermoVision A10T microbolometer camera from FLIR Systems and employing a long pulse excitation through tungsten halogen lamps.

Using the same principles as short pulse or flash thermography, a system based on thermal lamps and an uncooled camera was developed as a low cost alternative by the RCNDE, Department of Mechanical Engineering at University of Bath, UK. The use of long pulse excitation increases the contrast of subsurface defects due to the longer exposure to the heat source that improves their detectability. This increase in defect contrast compensates for the lower thermal sensitivity of uncooled cameras (compared with the actively cooled cameras found in use in most other thermographic systems) and the poor binarization of the analogical output (8bits).

Several tests have been carried out on CFRP test pieces containing a range of real and artificial defects. In Figure S.- 8, the grey dots represent the defect depths and diameters which were tested. The other symbols and lines show the sizes and depths of defects that were just detectable. Defects in all combinations of depth and size below these lines were detectable.

It can be seen in this figure how an increase in the duration of the long-pulse heating using the A10T camera, allows to detect by means of this technique defects comparable to those detected using flash excitation and the more sensitive Merlin camera. A graph as shown in Figure S.- 7 can be obtained for each heating time; showing that detectability occurs when both criteria are satisfied.

Additionally, the theoretical simulations predicted similar results for flash and long-pulse excitation of more than 2.5s duration, while really this requires a longer heating time. However this mismatch is explained by the differences in the non-uniformity of the heating for each test. It is important to highlight that for a long-pulse excitation the heating of non-uniformities is much more influential on the temperature decay and, they can be mistaken for defects. In the very first moment after the heating pulse has been delivered, more defects are already shown and it is quite difficult to distinguish between the behaviour of non-uniformly heated areas and defective areas. It is also difficult to estimate the depth of the defects, as the information prior to the defect appearance is lost.

S.4 Automation of the thermographic sequence processing

The thermographer should have a basic knowledge of the radiation principles, the fundamentals of heat transfer, the inspected material and/or process, and the equipment. Personnel qualification and certification standards (level I, II and III) for Infrared and Thermal Testing exist, indicating that human expertise is a critical part of the Thermography system. Analysis of raw thermal data is a qualitative inspection method relying on the training and experience of the thermographer.

Image processing techniques help on the completion of this task. Various methods have been developed around the world to improve and widen the use of IT, but human intervention and subjectivity is still present when the thermographic sequences have to provide quantitative results. Independency of the operator's point of view analysis of such sequences is one of the goals that the author, among others, has tried to get. In order to do that, a priori knowledge of the specimen is fundamental.

The problem of sound area location is solved with the differential absolute contrast (DAC). DAC is based on absolute contrast. However, instead of finding a sound area somewhere on the image, the sound area temperature is computed locally assuming that on the first few images a local point behaves as a sound area. DAC is based on the 1D solution of the Fourier diffusion equation for a Dirac delta function applied on the surface ($z=0$) of a semi-infinite body.

The first step in DAC is to define t' as a given time value between the instant when the pulse has been launched t_0 , and the precise moment when the first defective spot appears on the thermogram sequence, i.e. when there is enough contrast for the shallowest defect to be detected, t_1 . At t' , there is no indication of the existence of a defective zone yet, therefore the local temperature for a sound area is exactly the same as for a defective area. From this result and

the 1D Fourier model, the temperature of the sound area can be computed for every pixel at any time t .

S.4.1.1 Assessment of the acquisition times

The complete thermogram sequence is composed by distinctive elements: a cold image, saturated thermograms, the first useful thermogram, the subsequent valid thermograms and the Last Recorded Thermogram.

At time t_0 , before the heat reaches the specimen's surface, a cold image is captured. The cold image can be used to eliminate spurious reflections due to emissivity variations and to reduce fixed pattern artefacts. This is attractive for thermal data visualization and quantification although it is less useful when working with phase delay images.

During (and shortly after) the application of a heat pulse, the acquired thermograms are temperature saturated, i.e. the reading is out of the calibration scale and no accurate measure can be computed. The actual number of saturated thermograms depends on the sampling frequency and on the thermal properties of the material being inspected: low conductivity materials remain saturated longer than high conductivity materials, and more thermograms, saturated or not, will be recorded using high sampling rates. Saturated thermograms give no valuable information and therefore can be safely discarded from the processing stage.

The first useful thermogram that comes into sight after saturation is known as the Early Recorded Thermogram (ERT). Ideally, defects are still not visible on the ERT, however, this condition is not always found in practice, especially when inspecting shallow defects on high conductivity materials using low sampling frequencies and/or when strong non-uniform heating is present. Normally, this situation does not constitute a problem for defect detection purposes. However, since depth is a function of time: $z \sim t^{1/2}$, special care must be taken in order to perform quantitative analysis.

Starting at the ERT at t_1 , all subsequent thermograms are of interest for defect inspection and constitute the thermogram sequence. The last acquired image at t_N corresponds to the Last Recorded Thermogram (LRT). From this point on, temperature variations are considered negligible.

Temperature decay curves for both the defective and the sound areas behave similarly on the first instants after the application of heat since the heat front has not reached the defect yet. However, deviation from the $t^{1/2}$ dependency on the useful part of the thermogram provides an indication of the presence of a defective area. This is, in fact, the basis for defect detection in active thermography.

Avoiding highly subjective algorithms, only TSR and DAC techniques are interesting for automation. Both use the 1D approximation to model the heat conduction in solids. Both identify a linear trend in a bi-log plot of the temperature surface increase versus time. In both cases, the acquisition times

should be precisely known to follow a line of $-1/2$ slope. Incertitude of first instants is important.

S.4.1.2 Linear fitting

The analysis of a thermographic sequence for the detection of subsurface defects can be therefore reduced to the identification of the -0.5 slope in the surface temperature decay for each pixel within the image. The simple knowledge whether the sample can be modelled as a 1-D semi-infinite homogeneous body or it cannot help the analysis. It can be done, in an initial approximation, linearly relating the logarithm of the temperature increase on sample surface to the logarithm of the time that the process of heat conduction takes. In such case, and under Pulsed Thermography (PT) excitation, the heat transfer at the surface follows a linear decay, approximating a -0.5 slope, during all the inspection time for a non-defective or sound area in a logarithmic space. On the contrary, thermal decay for a defective area diverges from this behaviour, as it is shown in Figure S.- 9.

Up to now, both determining of the initial time t' as well as establishing the best agreement with the "ideal" slope of -0.5 for a free-defect area have been left to the user. These issues always give some uncertain results, mainly taking into account that subjectivity is always involved in human criterion.

The identification of a linear pattern is the object of the following techniques. Blending these techniques to the experience in IT, the automation of decision tasks is proposed and the human subjectivity removed.

S.4.2 Statistical Methods

Linear fitting uses the method of least squares when fitting data. The fitting process requires a model that relates the response data to the predictor data with one or more coefficients. In the case of linear fitting, a linear model is defined as an equation that is linear in the coefficients.

Least-squares fitting involves the minimization of the sum of the squared residuals. There are two principal instances where this minimization produces a less than satisfactory fit. The first is where significant outliers are present. In this case, the square of the residuals of these outlier points may, within a given region, significantly shift the fitted curve away from the bulk of the data. The other instance is when the Y-data span more than several orders of magnitude. The squared residuals of the largest valued Y-points can overwhelm the influence of the squared residuals of the smallest Y-valued points, causing the smallest Y-value points to either be poorly fitted or not fitted at all. Other instances are so scarcely lineal than the response errors don't follow a normal distribution and the lack of homoskedasticity. In the homoskedastic model, it is assumed that the variance of the parameter is constant for all values of x or equivalently, that the variance of the error term is constant for all values of x .

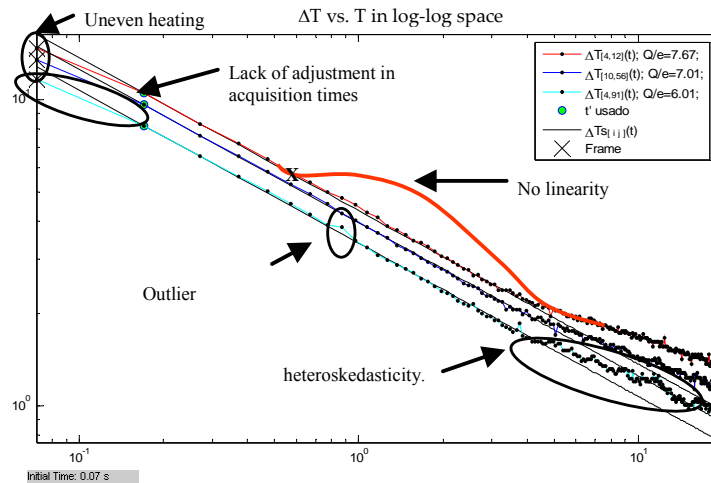


Figure S.- 9 Common instances in the linear fitting of temperature contrast profiles in IT. In some cases, the identification of a $-1/2$ line is not obvious.

Figure S.- 9 represents temperature evolutions in log space of defective and sound area pixels. Obviously, different features mentioned above affect the linear fitting of these evolutions. Special care has to be taken in the fitting of these profiles. Data that requires a logarithmic Y-scale to see all of the points may be a good candidate for robust fitting, especially if four or more major log divisions are present. Next sections show the alternatives proposed by the author.

S.4.2.1 Interpolation algorithm

An automation of the DAC method is proposed here, making the process of contrast optimization independent of the operator and, instead, basing it on several mathematical certainties. The Interpolated Differentiated Absolute Contrast (IDAC) algorithm contributes to avoid the necessity of human intervention during the process of obtaining the contrast images.

For each pixel, the developed algorithm can be summarized in the following steps:

- Identify, among the temporal evolution data, the first point having a slope greater than a given threshold (-0.35 has been used based on experience). That point in the curve could be interpreted as the beginning in the detection of a defect (defect's point).
- From the first point of data up to the defect's point, a search of the optimization point is run. Basically, the optimization point is the one that has the closest slope to -0.5 in fitting the curve among itself, the next point and the following one, in the logarithmic scale representation.
- Once the optimization point is found, the points in the temporal range $[t_0, \text{optimization point}]$ are compared with those obtained applying the coefficients of the power regression (line in the logarithmic scale). A minimization function has been implemented for getting the optimal epsilon, which, added to the temporal axis, best fits the t_0 value. In this way, a good $Q/e[i,j]$ estimation could be obtained.

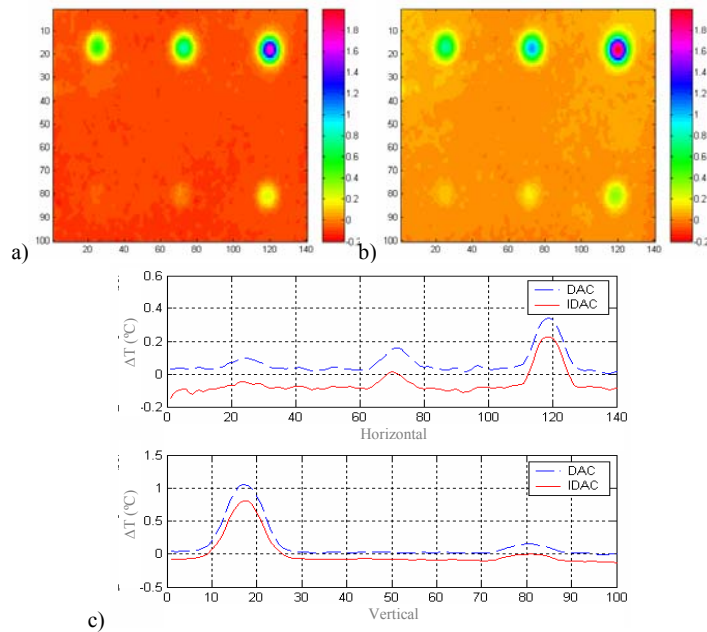


Figure S.- 10 a) DAC image b) Unique IDAC image to compare with c) Horizontal and vertical profiles at pixels 80 and 72, respectively. Both methods detect same defects.

More specifically, the particularities of the IDAC are: pixel-by-pixel computation of a corrected acquisition time, fitting best the -0.5 slope and 1D thermal model assumption. Using the proposed algorithm, very useful information regarding subsurface defects detection and their size and depth are obtained automatically. Moreover, thanks to this automation, the data obtained are really objective because the process of contrast optimization is independent from the operator since it is based on several mathematical certainties. Experimental works using different materials and plate configurations were realized. Figure S.- 10 shows a unique image where all the defects can be observed. IDAC maintains a small shift in the results respected to DAC. However, it is essential to remind that IDAC is an absolute automatic procedure.

The ultimate step, quantification, applies different methods that rely on a sort of calibration either with a thermal model or with various specimens representative of unknown ones. For instance, one can compute defect depth z by extracting a few parameters on the thermal contrast curve such as the maximum contrast and its time of occurrence:

$$z = A \cdot t_{\max}^{1/2} \cdot C_{\max}^h \quad \text{ec. S.3}$$

with parameters A and h obtained from the calibration process. Other functions can be used for segmentation and shape estimation.

S.4.2.2 Statistical robust methods applied to Thermography

In robust statistics, robust regression is a form of regression analysis designed to circumvent the limitations of traditional parametric and non-parametric methods. One instance in which robust estimation should be considered is when there is a strong suspicion of heteroscedasticity. Heteroscedasticity allows the

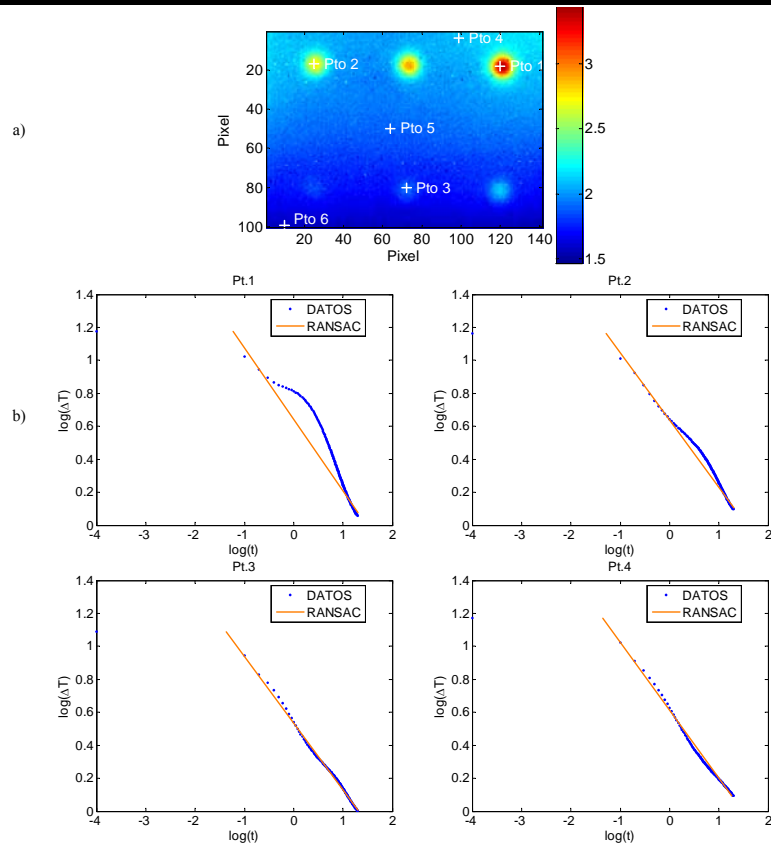


Figure S.- 11 Linear fitting with RANSAC algorithm. a) Selection of points analyzed in b).

variance to be dependent on x , which is more accurate for many models. Another common use of robust estimation is when the data contain outliers.

The random sample consensus (RANSAC) estimator is adopted to eliminate the undesirable effects shown in Figure S.- 9. The RANSAC algorithm of Fischler and Bolles searches for suitable solutions directly using the data, repeatedly constructing solutions from randomly sampled minimum subsets. These subsets are not restricted to either an assumption of smoothness or the computational form of the objective function. In contrast to most optimisation algorithms, which attempt to maximise the quantity of data used to identify a solution, RANSAC constructs solutions from the minimum subset of data necessary (e.g. two points for a line). Provided that sufficient repetitions are performed, RANSAC is expected to identify solutions computed from outlier free data. RANSAC gives us the opportunity to evaluate any estimation of a set of parameters, independently of how robust or accurate the method that generated this solution might be.

Applied in IT profiles as those in Figure S.- 9, the RANSAC algorithm obtains results as those in Figure S.- 11.

S.4.3 Transformation of the data space

A wide variety of transformation algorithms can be applied to thermographic pulsed data in order to analyze the information in an alternative space. Extracted from its common use in machine vision and image processing, Hough and Radon

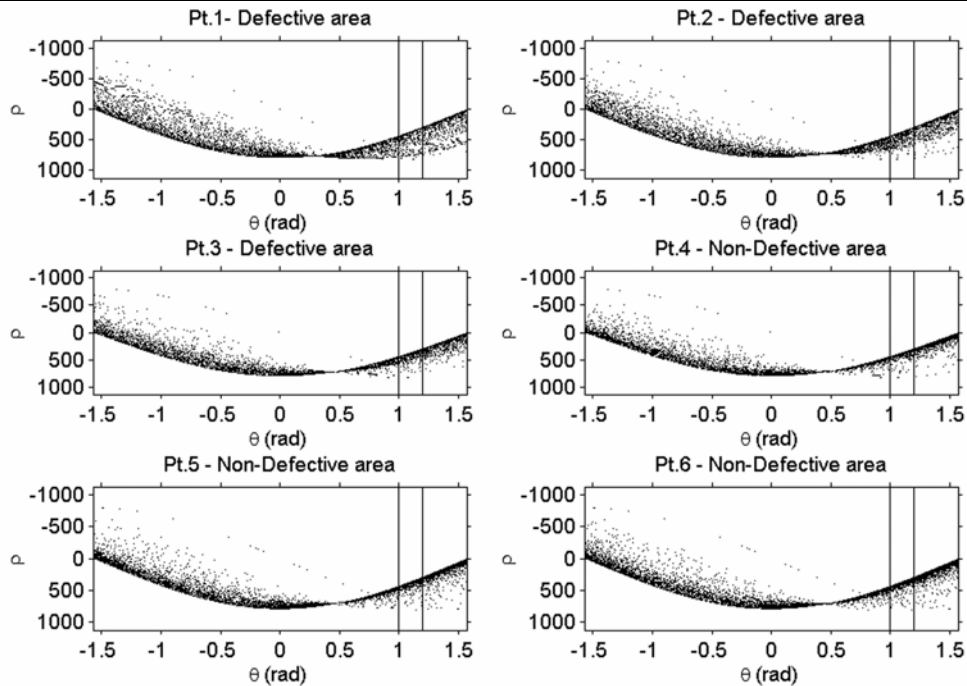


Figure S.- 12 Parameter space (ρ, θ) for the free-defect area pixels and the defective area pixels on Figure S.- 11. Curves are similar in both graphs but the curves spread more in the region $1 < \theta < 1.2$ for the graph of pixels belonging to a defective area because there are more points that do not belong to the same line.

transforms are able to convert two dimensional images with lines into a domain of possible line parameters, where each line in the image will give a peak positioned at the corresponding line parameters. This has lead to many line detection applications.

S.4.3.1 Hough Transform

The Hough Transform (HT) is a standard tool in image analysis that allows recognition of patterns in an image space. Basically, this technique finds curves that can be parameterized like straight lines, polynomials, circles, etc., in a suitable parameter space. The HT uses the parametric representation of a line:

$$\rho = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta \quad \text{ec. S.4}$$

A pixel at coordinates (x, y) is transformed into the parameter space (ρ, θ) , where the variable ρ is the distance from the origin to the line along a vector perpendicular to the line, and θ is the angle between the x-axis and this vector. The HT generates a parameter space matrix whose rows and columns correspond to ρ and θ values respectively. Each point (x_i, y_j) , with $i, j = 1, \dots, N$, is transformed into sinusoidal curves in the (ρ, θ) plane, as those shown in Figure S.- 12. The intersection of all those curves shows the existence of a line in the image.

However, assuming a semi-infinite homogeneous material, the goal is not to identify a line in the temporal profile of each pixel, which could be considered as a fitting or regression of data. The goal is to know if that pixel belongs to a defective or a non-defective area. Therefore, locating the number of points that follows a -0.5 slope makes the discrimination. From ec. S.4, it can be deduced that

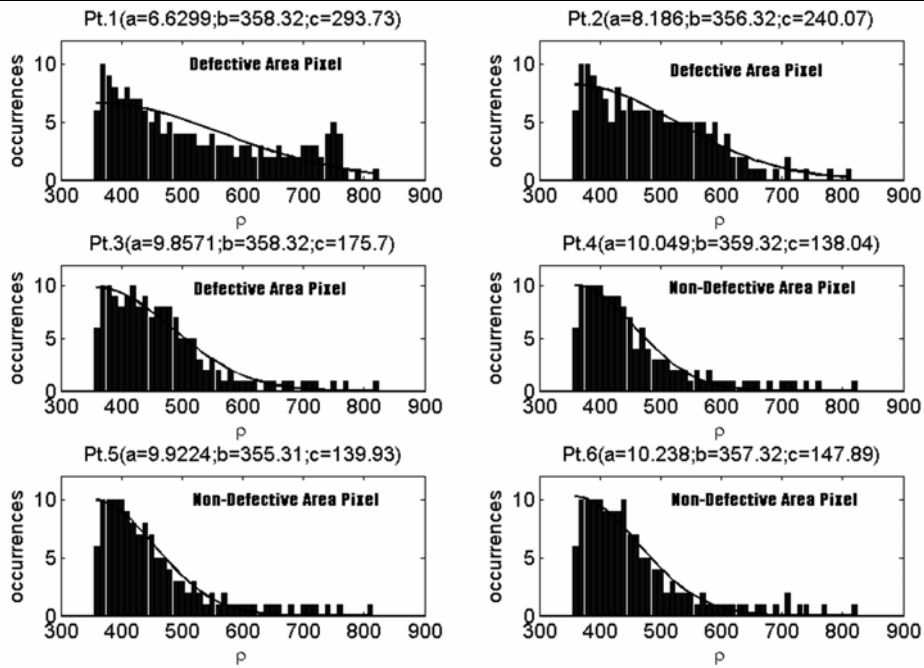


Figure S.- 13 Histograms of values in column $\theta \approx 1.1071$ rad for those pixels selected in Figure S.- 11. In each graph the parameters of the fitting $\text{fit}(x) = a \cdot \exp\left(-\frac{x-b}{c}\right)$ are given.

$y=mx+b$ with $m=-\cos(\theta)/\sin(\theta)$. Thus, for getting the points that follow a slope $m=-0.5$, the information resides in the column $\theta \approx 1.1071$ rad.

If all the points in the temporal history agree with a line of -0.5 slope, what should be seen in the Hough space is that all the curves intersect in only a point at the column $\theta \approx 1.1071$ rad. The coordinate ρ for that point will be the offset of the line. Moreover, there are as many points in the column as lines with different offsets but the same -0.5 slope in the temporal history. Therefore, analyzing the distribution of the matches in the column selected above, it is possible to know if the pixel belongs to a non-defective area (sharp distribution) or if it belongs to a defective area (broad distribution, broader for deeper defects), as is shown in Figure S.- 13.

Once the HT is applied to each pixel-temperature temporal history, the algorithm evaluates the obtained histograms fitting them with an exponential function. In order to know if a pixel belongs to a defective or a non-defective area, it is enough to observe the parameters of the fitting. As seen in Figure S.- 13, the coefficients a and c of any pixel show a correlation with the existence or not of a defect, as well as with its depth. Mapping the values of these two coefficients, an image (see Figure S.- 14) is obtained where it is possible to divide easily the pixels depending on the existence or not of the defects. The parameter taken into account for the results is the c coefficient of the used exponential fitting. Similar images and results can be also obtained using the parameter a . Computing the two-dimensional correlation coefficient between the obtained contrast images, values of 0.93 are achieved.

When a defect is presented, the depth can be also estimated. The information according to the depth is maintained and also the colour scale

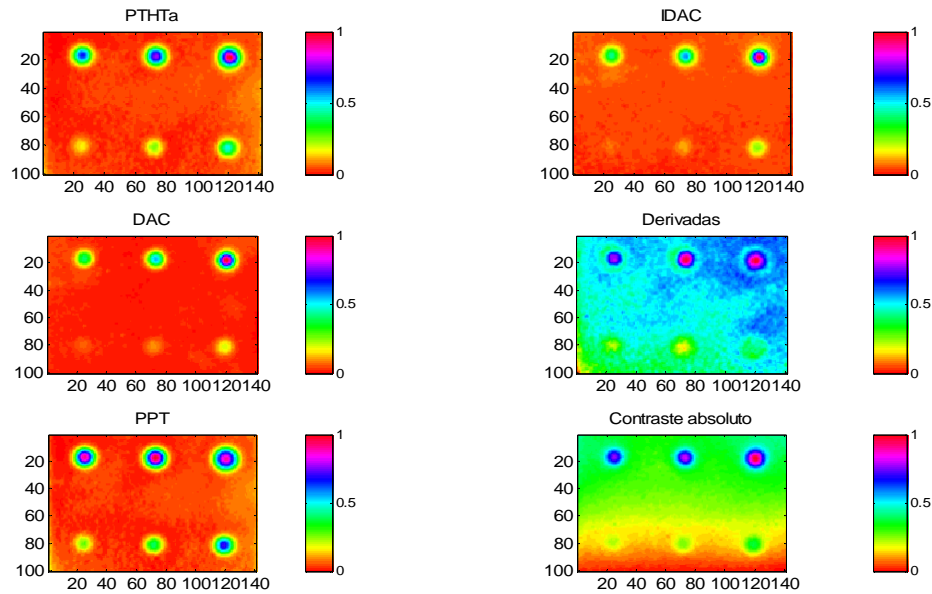


Figure S.- 14 A comparative among different methods of analysis of thermographic sequences is shown. Best contrast images for: a) PHTa algorithm b) IDAC algorithm c) DAC method d) Best of first and second derivatives e) PPT method and f) regular absolute contrast (contrast of the image with respect to the average of pixels belonging to a window of 20x20 pixels in the center of the image).

presents a good correlation with the depth as can be seen in Figure S.- 15. This PHTa algorithm has the best linearity of all the algorithms considered.

S.4.3.2 Radon Transform

The Radon transform is an integral transform whose inverse is used to reconstruct images. The Radon transform $g(\rho, \theta)$ of a function $f(x, y)$ is defined as the integral along a straight line defined by its slope and line offset. Several expressions of the Radon transform exist, but its most popular form uses the parametric representation of a line, where θ is the angle and ρ the smallest distance to the origin of the coordinate system.

The parametric representation of a line is also used by the other common computer vision operation, i.e. the Hough transform. Therefore, being closely related, the radon function can implement a form of the Hough transform used to detect straight lines. The Radon transform is able to convert two-dimensional

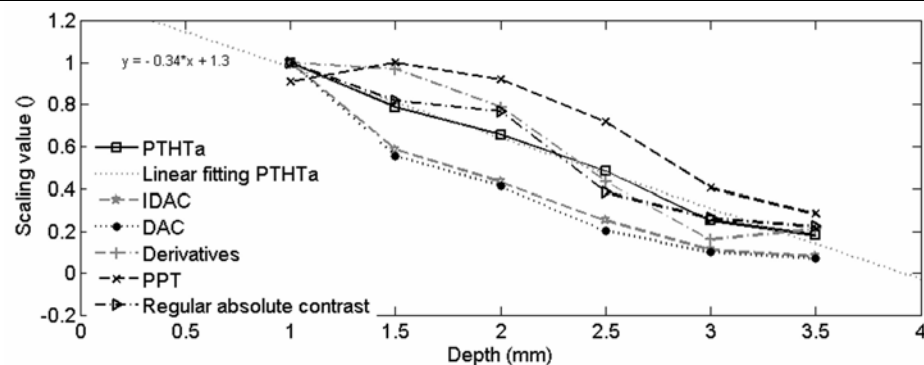


Figure S.- 15 The scaling value (dimensionless) for each defect on the graphs within Figure S.- 14 is printed versus the depth of the defect. The full scale colorbar of all the images are set between [0,1] to compare. The new PHT algorithm herein presented shows the best linear behavior.

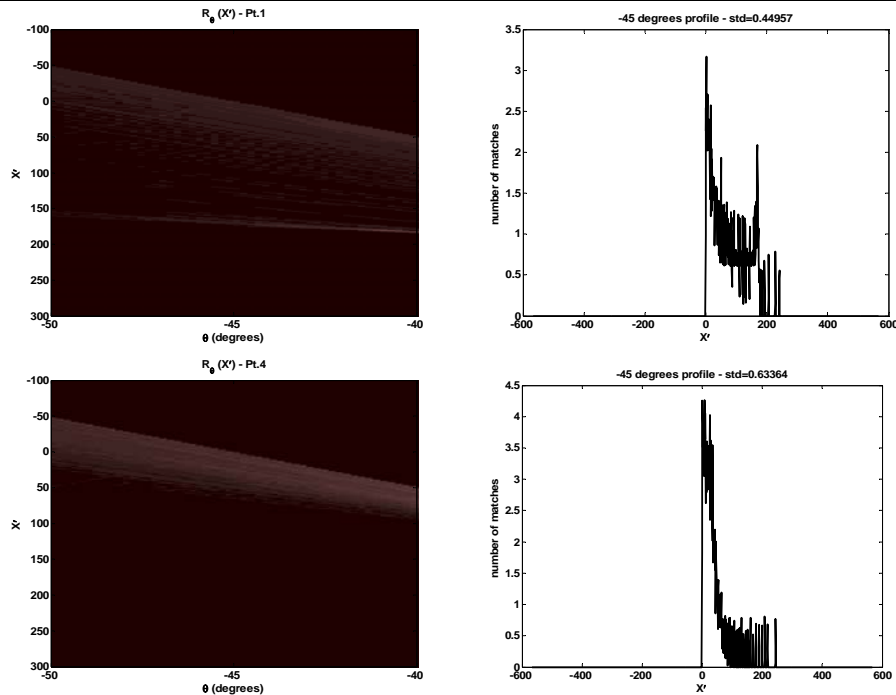


Figure S.- 16 Transformed domain, for some defective area (Pt. 1) and free-defect area (Pt. 4) pixels on Figure S.- 11. On second column, differences on sharpness of distributions are clear.

images with lines into a domain of possible line parameters, where each line in the image will give a peak located at the corresponding line parameters. This has led to many line detection applications within image processing, computer vision, and seismics.

By applying the Radon transform to captured thermographic sequences, each pixel evolution can be transformed into the Radon domain. The various slopes of the temporal decay of pixels are associated to peaks located in the correspondent Radon transform matrix. However, the goal is not to identify a line, which could be considered as a fitting or regression of data. The goal is to distinguish if a pixel belongs to a defective or a non-defective area. Therefore, assuming a semi-infinite homogeneous material, only the inspection of the -0.5 slope area is required to make the discrimination.

Translating that slope into angles, a -0.5 slope corresponds to -45 degrees. If all the points in the temporal decay agree with a line of -0.5 slope (-45 degrees), what should be seen in the Radon domain would be a strong peak just in a point at the column -45 degrees. This simplicity never happens, because the temporal evolutions of the superficial temperature gradient can be considered highly noisy lines in the log space. Analyzing the distribution of the matches in the selected column for the Radon transform matrix, we can find different profiles. A correlation exists with the existence or not of a defect, as well as with its depth. Consequently, it is possible to identify pixels belonging to a non-defective area as they present a sharp distribution of matches at column -45 degrees. Otherwise, pixels belonging to a defective area show a broad distribution, broader for deeper defects, as it is shown in Figure S.- 16.

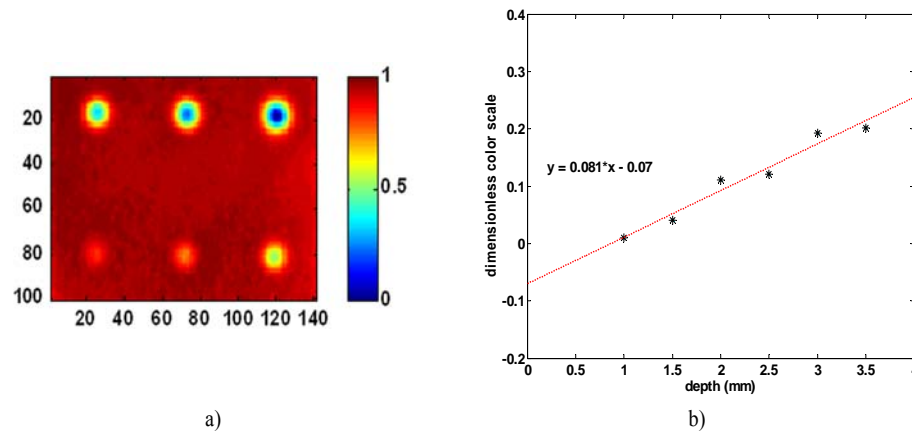


Figure S.- 17 a) Unique contrast image for Radon Transform algorithm b) Dimensionless value on the Radon Transform obtained image for each defect versus the depth of the defect. The presented algorithm exhibits a high linear behavior. The deviation from the linear fitting is always less than 2%.

Once the Radon transform is applied to each pixel-temperature temporal history, the algorithm evaluates the obtained distributions of matches and performs some statistics on them (mean and standard deviation). In order to classify a pixel in a defective or a non-defective area-pixel, it is enough to observe the results of those statistics. By mapping the values of the standard deviation, an image as the one depicted in Figure S.- 17a is obtained, where it is possible to easily classify the pixels depending on the existence or not of defects. When a defect is to be found, the depth can be also estimated in a relative way as shown in Figure S.- 17b.

In summary, this algorithm makes feasible the elimination of errors due to different operator's interventions and then, it offers a better performance in the inspection of specimens. All the information is contained in just one image and leads to a quantitative estimation of the defect depths. Besides, the selection of a sound area, necessary in most thermographic post processing techniques, is here eluded due to its being based in a 1-D model. However its computation carries more time than PHTTa.

S.4.4 Identification of linear behaviours

Apart from the bi-logarithmic plots of surface temperature contrast versus time shown above, several linear trends have been found in other thermographic inspections. In this section, other applications of the use of interpolations, statistical methods and data transforms as those in previous sections, are presented with the same goal of leading to automate analysis process of thermographic image sequences.

S.4.4.1 Phase behaviour

Above all methods used in Infrared Thermography (IT), those originating from Pulsed Phase Thermography (PPT) are getting more importance thanks to the fact that the thermal respond can be decomposed into amplitude and phase following the application of the Fourier Transform. Phase data provide good contrast between defective and non-defective areas being practically undisturbed

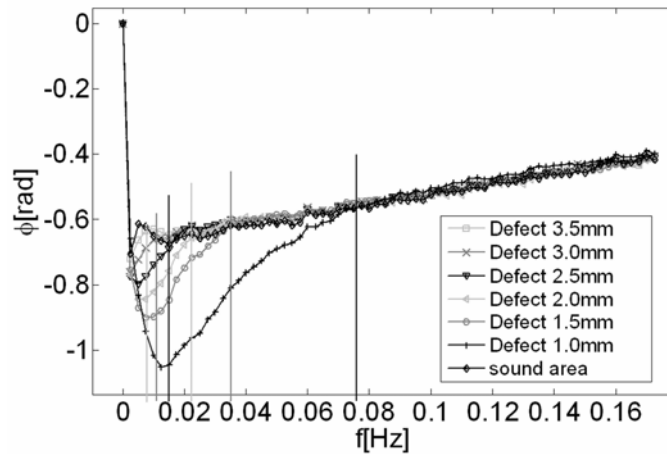


Figure S.- 18 Phase profiles for a PlexiglasTM specimen with 6 flat-bottomed holes ($N=450$, $f_s=4.5$ Hz, $\Delta t=0.88889$ s, $T=400$ s), the one in Figure S.- 11. Bars show the approximate locations of f_b .

by non-uniformities in heating, environmental reflections, surface emissivity variations and surface geometry. PPT has proved to be effective in the quantitative and qualitative evaluation of defects on different specimens.

Moreover, PPT provides a good enough quantitative results on defect depth analyzing the blind frequency f_b , i.e. the frequency at which a defect at a particular depth presents enough phase contrast to be detected. Figure S.- 18 shows the positive part of the phase profiles for a Plexiglas specimen with 6 flat-bottomed holes. Human intervention is necessary in the determination of f_b since phase contrasts with respect to a sound area are involved in the process. This adds certain subjectivity.

In order to estimate f_b , an absolute phase contrast must be defined as the difference between the phase of the zone of interest and a non-defective area or sound area. Blind frequency values are calculated using the phase contrast definition $\Delta\phi = \phi_d - \phi_s$, by locating the frequency at which no significant phase contrast can be observed: $\Delta\phi < \text{threshold}$. Threshold values are established based on experimentation and depend on a variety of factors related to both the materials being inspected and the setup configuration (thermal properties, signal-to-noise ratio, etc.).

Therefore, the knowledge of the position of a sound area is necessary. However, analyzing Figure S.- 18, the selection of a sound area can be avoided by noticing that all phase profiles merge at high frequencies into a straight line whose slope and shift can be obtained by, for instance, least square regression. All this can be done if it is assumed that phase data is correctly sampled (i.e. time resolution Δt is high enough) and truncated (i.e. truncation window T is large enough) for the particular combination of sound and defective thermal properties and defect depth.

In that sense, the implementation of the techniques presented previously (i.e. interpolation, statistical robust methods, Hough Transform (HT) and Radon Transform) to phase analysis can be executed. It makes possible the elimination of errors due to different operator's point of views and so, represents better capabilities in the assessment of specimens.

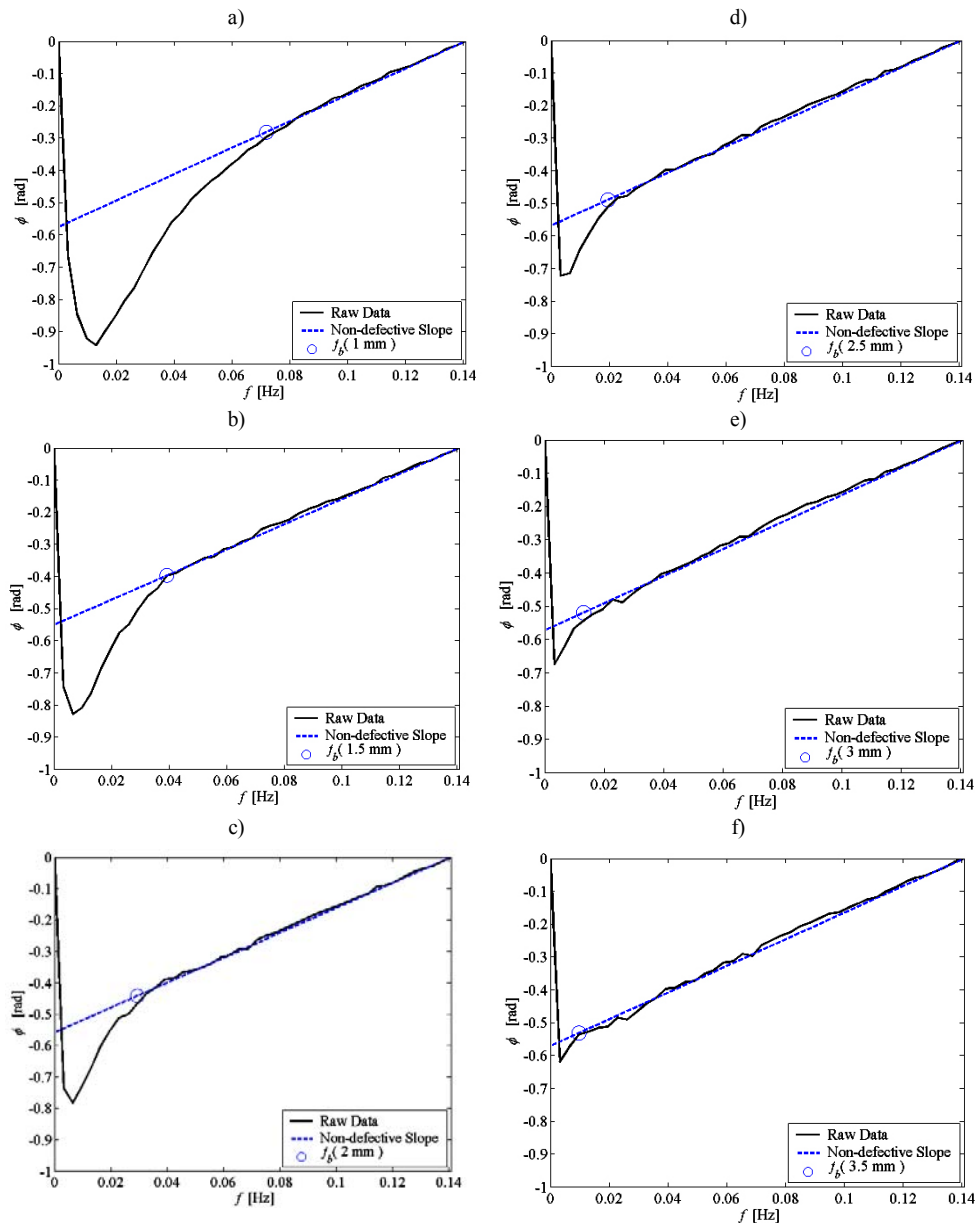


Figure S.- 19 Phase profiles for the 6 defects on Figure S.- 11. The non-defective slope (dotted-line) and the estimated blind frequency (circle) are also shown for each depth..

For example, it is possible to mathematically locate the frequency at which the separation in phase profiles occurs (i.e. the blind frequency) without the need of phase contrast calculations. Basically, the algorithm estimates the curve slope by least squares regression starting from the higher available frequency to a given frequency. This frequency is progressively decreased (so more points are included on the regression at each time) and the slope is recalculated and compared to the previous value. The procedure is repeated up to a frequency at which the slope is considered to diverge from the non-defective slope. Precision parameters were established based on experimentation. From now on, this algorithm based on interpolation is called Poly.

For the sake of clarity, phase profiles for the defective zones in Figure S.- 11, are redrawn individually in Figure S.- 19. The corresponding depth for these

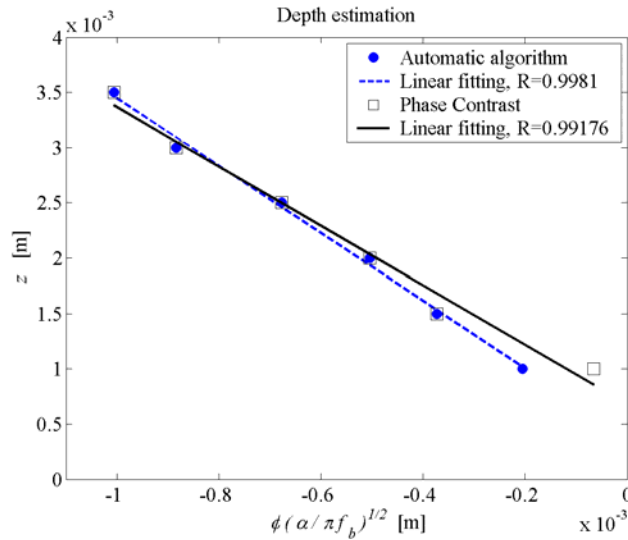


Figure S.- 20 z vs. f_b correlations using phase contrast and the proposed automatic algorithm.

profiles increases from the top left to the bottom right. A dotted blue line represents the slope for the non-defective part of the phase automatically calculated with the algorithm. Blind frequency values are marked with a blue circle for each case. Results obtained from both contrast calculations (with human intervention) and automatic procedure, are presented in Figure S.- 20. Good correlation validates the automatic method.

On the other hand, algorithms based on data transformations also remove perfectly the outliers and non-linearity of phase profiles. In fact, in Figure S.- 21, the dependence of the fitting accordance on T is exposed. Fitting results using the HT are shown darker colour. Comparison with least squares regression is also shown for two cases: with no-human intervention at all (appearing as 'linear' in Figure S.- 21) and with minimum human intervention (referred as 'Poly' in Figure S.- 21) as described in previous paragraphs. All fitting techniques are affected by the number of points included in the regression, however, the HT present less variations on the estimation of f_b for different T . No weighted-with-frequency interpolation can be considered due to the fact that the blind frequency is unknown for the entire image. Taking a safe number of points is neither a desired solution because the processing time increases.

S.4.4.2 Electrical excitations

In some applications, thermal evolutions can be fitted to a linear tendency. For example, if a ramp of electrical current is generated in an element purely resistive, the temperature contrast observed is quite linear. In this section, thermography is presented as a NDT&E technique for the assessment of radiant heaters in the manufacturing industry.

Looking for a quick and safe NDT technique useful for radiant heaters, a system is developed based on infrared thermography. Heat is stimulated in each radiant heater by a short electrical pulse (0.1 sc) and an infrared camera captures the evolution of the heater temperature. Different parts of the heater show evolutions (all following a quasi linear tendency of different slope) from which it

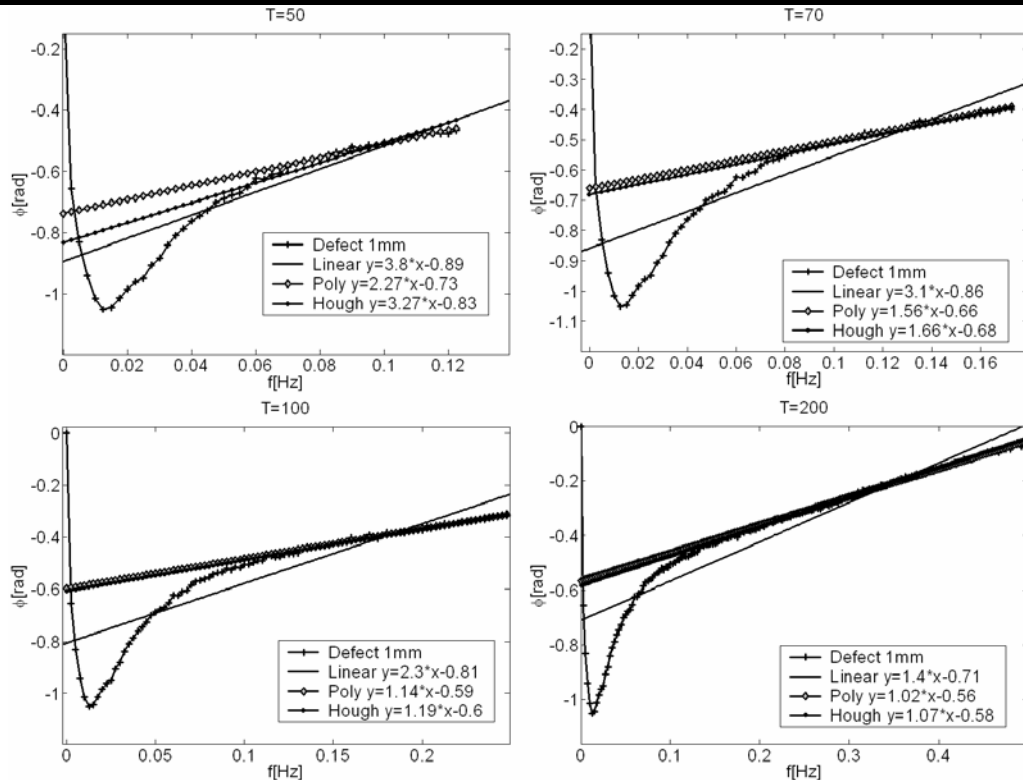


Figure S.- 21 Impact of T on phase curves fitting ($f_s=4.5$ Hz, $\Delta t=0.88889$ s).

is possible to identify defects of several origins. Differences are also clear between the wire and the substrate

The heating can be approximated by a straight line as it was demonstrated in Figure S.- 22. For instance, the analysis of the heating wire during the heating flank shows differences among pixels corresponding to defective points and pixels belonging to non-defective areas of the wire. The detection of defects can be carried out just considering the value of the slope on heating flanks.

The thermographic images of interest are those regarding just the heating flank. In order to make a correct linear fitting, the exact time of the beginning and end of the impulse must be known. Certain synchronization between the electrical pulse source and the camera must be provided. However, this is not an easy task. Nevertheless, the use of specialized transforms applied in image processing and created for the detection of lines in noisy environments may help. The data transformations presented above are clear candidates.

To calculate the actual slope of the heating flank, the image processing transforms presented above are used avoiding the knowledge of the exact frame numbers corresponding to the beginning and end of the impulse: the Hough and Radon transform. In that sense, the automation is provided by the development of an algorithm that looks for the slope of the heating evolution of each pixel.

Just with the observation of the unique image, like that in Figure S.- 23, provided by the algorithm, an operator can quickly locate the possible defects. Hot points (as seen in the colour palette of Figure S.- 23) will correspond to areas

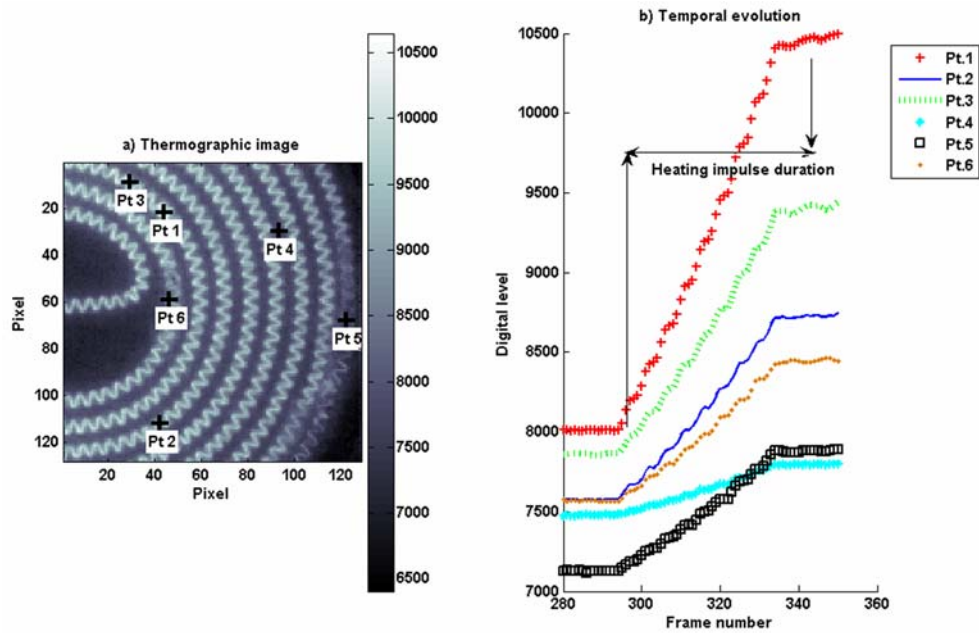


Figure S.- 22 a) Location of pixels under inspection. Pt 1, Pt 5 and Pt 6 are located on defects along the wire element. Pt 2 and Pt 3 belong to defect-free points in the heating element while Pt 4 is on the substrate. b) Digital levels of infrared radiation intensity along the sequence recorded showing a linear temporal evolution.

where the slope is higher and, according to Joule's law, where there is a bigger resistance. Therefore, it can be inferred that an excess of material exists in those parts. Colder points along the wire pattern are related to areas with a lower resistance. This can be due to cuts in the heating cable, straight segments or brackets (small metal pieces which anchor the heating cable to the high thermal capacity substrate). Although they are not strictly defects, brackets should be well placed for the correct fixing of the wire to the substrate. They are also revealed in the image. Blurring areas are related to defective fixing of the wire to the substrate. If the blurring is observed over the heating element area, it is related to an area without substrate underneath. Otherwise, if the blurring is observed between spires, then part of the substrate is partially burying the heating element.

S.4.5 Discussion of results

Focused on the material subsurface defect detection, in this chapter several tools have been developed to automate the analysis of thermographic sequences. In this way, subjectivity of human decisions is removed and it is possible the elimination of errors due to different operator's point of views and so, represents better capabilities in the assessment of specimens.

The selection of a sound area, necessary in the most part of the thermographic post processes, is eluded if a 1-D model is used. This detail helps to obtain results that are independent on the non-uniformity that could be suffered during the heating. The analysis of a thermographic sequence for the detection of subsurface defects is then reduced to the identification of the -0.5 slope in the surface temperature decay for each pixel within the image, under Pulsed Thermography (PT) excitation. Employing techniques commonly used in

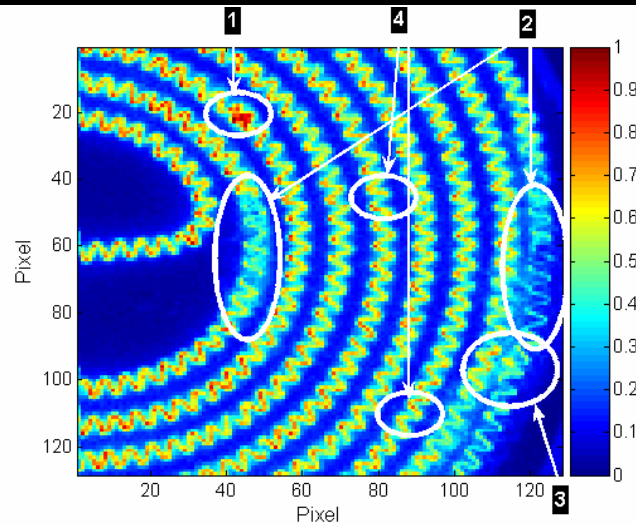


Figure S.- 23 Image containing the normalized heating slope of each pixel obtained by means of the Hough transform. Several areas are circled. These exhibit big slope differences with the neighborhood: 1) defects due to excess of heating material (links, doubled coils); 2) deficit of substrate underneath heating cable; 3) excess of substrate accumulated between spires; 4) brackets.

statistics and computer vision, several algorithms are developed in order to look for the -0.5 slope in the temporal temperature decay profiles of each pixel. The influence of the initial acquisition time, which adds an error to the measurement and a high non linearity in the log representation of the temporal decay, is also avoided thanks to the fact that dispersed data are not so representative in an algorithm based on occurrences.

The final result provided by all these algorithms is an image showing the different defects, avoiding the necessity of evaluating parameters as relevant in other algorithms as the delayed time of the first image or any subjective point of view in the analysis. All the information is contained in only one image and leads to a quantitative estimation of the defect depths.

Among the algorithms mentioned above, the main difference yields in the time consumed in the computation of the same sequence. Statistical methods do not require transformations of data and, thus, are faster. Between the Hough and Radon transforms, the fastest algorithm is the one based on the Hough transform, as it can be understood as a discrete version of the Radon one. Optimization is still a future research line.

The principal limitation for the set of algorithms presented is that the specimens under inspection should be semi-infinite homogeneous samples because this algorithm is supported on a 1-D Fourier diffusion equation approximation. However, experimental works using a Plexiglas specimen were performed showing a good agreement with other techniques where the operator point of view and experience is highly relevant.

It must be remember once more that these algorithms are free of human intervention. Software tools have been developed to get a function, which only requires the name of a 3D matrix containing the full thermographic image sequence. The function returns only one image where all defects detectable are present.

Part 3 Conclusions

S.5 Conclusions and Open Research Lines

The previous chapters have described the work carried out in this Thesis, reviewing the obtained results and discussing them. Some lines will be devoted to emphasizing the main conclusions, stressing the original contributions of the work and outlining some possible future lines of research.

The central guideline throughout this thesis work has been the use and improvement of the techniques involved in the field of Infrared Thermography. Focused on the subsurface defect detection in materials as one of the most important niches where IT offers its advantages (as can be extracted from the State of the Art of Thermography, chapter 2), the first contributions are focused on the comparison among thermographic systems. The development of different techniques and systems based on infrared radiation encourages the introduction of some rules to compare them. In this sense, chapter 3 includes the text which analyses in depth the concept of detectability regarding subsurface defects. The factors that alter the detectability, and offer ways to improve it, are also presented. Finally, a compensation of a poor digitalization is provided using long-pulse excitations. Both, a low cost homemade system and a commercial one have been used as a basis to validate the new detectability criterion of subsurface defects using low binarization systems.

Chapter 4 deals with various approaches to the automation of the processes involved in the detection of subsurface defects in IT. The main goal of the different proposals has been to provide software tools able to help any operator in the analysis of thermographic sequences, avoiding as much as possible the inherent subjectivity of his decisions. Given that the analysis of a thermographic sequence for the detection of subsurface defects is reduced to the identification of the -0.5 slope in the surface temperature decay for each pixel within the image, several techniques for line identification are blended in the thermographic analysis.

The first approach has dealt with fittings and robust statistical methods that adjust the linear tendency of the surface temperature contrast in a way that traditional linear fittings cannot. There are two principal instances where this minimization produces a non-satisfactory fit: when significant outliers are present, and when there is low linearity (temperature evolution in a defective area).

The second approach has dealt with data transformations mainly used in computer vision to detect lines with images. Several transformations have been used to develop algorithms that identify the slope of the temperature evolution and relate the results with the presence of a subsurface defective area and its depth. Hough and Radon transforms have been used.

The final result provided by all these algorithms is an image showing the different defects avoiding the necessity of evaluating relevant parameters in other algorithms, as the delayed time of the first image or any subjective point of

view in the analysis. All the information is contained in only one image, and it leads to a quantitative estimation of the defect depths. The main contribution is the automation of the decisions involved in the analysis of the temperature evolution profiles.

In addition, another active approach has considered the automation of other processes as those related with the phase profiles (PPT fundamentals) and linear electrical excitations. In all of them, the identification of the slope of a linear tendency is fundamental and can be obtained by the application of the algorithms presented in this work.

According to the open research lines, several topics have been outlined in the course of this thesis, which could be the origin of future works. A first line could deal with new systems with better capabilities. Different excitations and exhaustive control of the source timing would provide better possibilities in generating internal thermal waves which, once studied and characterized, conduct to a better knowledge of the interior of the inspected specimens.

A second line could be focused on software improvements. Faster and more precise software with a friendlier interface can be developed. New algorithms and functions could be added, like shape and size estimation of the defects. New tools based on models different to the 1D model could enhance the efficiency in the analysis of more complex structures and materials (anisotropic and multilayers materials).

Part 4 Appendix

S.6 List of publications

Finally, it is necessary to mention that the contributions found here have originated numerous publications in SCI peer review journals and international conferences papers, as can be extracted from the revision of the last section, i.e. List of Publications.

Table2. List of Publications.

<i>Publications</i>		<i>Number of</i>		
		IT	Others	
International	Book chapters	1	-	1
	Refereed Journals	6	2	8
	International Conferences	20	7	27
National	National Conferences	3	6	9
Partial sum		30	15	
TOTAL		45		