

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA,
INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA

TESIS DOCTORAL

**CONTRIBUCIONES AL PREPROCESADO,
PROCESADO Y ANÁLISIS EN TERMOGRAFÍA
INFRARROJA APLICADOS A ENSAYOS NO
DESTRUCTIVOS**

Presentada por: **Rafael Hidalgo-Gato García**
Ingeniero Mecánico

Para acceder al título de: **Doctor por la Universidad de Cantabria**

Dirigida por: **Francisco Javier Madruga Saavedra**
Doctor Ingeniero de Telecomunicación

José Miguel López Higuera
Doctor Ingeniero de Telecomunicación

Santander, 2015

Tesis Doctoral: **Contribuciones al preprocesado, procesado y análisis en termografía infrarroja aplicados a ensayos no destructivos.**

Autor: **Rafael Hidalgo-Gato García**
Aspirante a Doctor Ingeniero por la Universidad de Cantabria

Directores: **Francisco Javier Madruga Saavedra**
Profesor Contratado Doctor
Universidad de Cantabria

José Miguel López Higuera
Catedrático de Universidad
Universidad de Cantabria

Tribunal que juzgó la Tesis Doctoral:

Presidente:

.....

Vocal 1:

.....

Vocal 2:

.....

Vocal 3:

.....

Secretario:

.....

El tribunal acuerda otorgarle la calificación de:.....

Santander, a de de 2015

A mi padre

*“Sólo aquellos que se arriesgan a ir demasiado lejos pueden descubrir
hasta dónde se puede llegar”.*

T.S. Eliot

Reconocimientos

Esta tesis ha sido desarrollada en el Grupo de Ingeniería Fotónica del departamento de Tecnología Electrónica, Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Cantabria. Los trabajos de investigación recogidos en esta tesis doctoral han sido posibles, en cierta medida, gracias a las contribuciones de los siguientes proyectos de I+D en los que se han enmarcado:

PROFIT: “THERMO-SPC”, IPT-310000-2010-001

“Desarrollo de técnicas fotónicas para supervisión y control de procesos de soldadura propios de la industria de componentes nucleares I” (SISTER-1).

“Sensores de Fibra Óptica para Seguridad y Protección” (FOS4), TEC2013-47264-C2-1-R, CICYT.

Se reconoce también las contribuciones de otros miembros del Grupo de Ingeniería Fotónica, especialmente a José Ramón Andrés, José Julián Valdiande y Pedro Anuarbe Cortés durante el desarrollo del proyecto Thermo-SPC y a Patricia Mingo y Paula Albendea en el proyecto SISTER-1.

Agradecimientos

Una vez terminada la tesis, llega el momento de dar las gracias a todas las personas que me han ayudado a llegar a este punto. Esta tarea no me resulta nada fácil porque ha sido mucho el apoyo que he recibido de muchísimas personas durante todo este tiempo, así que espero no dejar de mencionar a nadie.

Me gustaría empezar dando las gracias a José Miguel López-Higuera por confiar en mí y darme la oportunidad de formar parte del Grupo de Ingeniería Fotónica cuando más lo necesitaba. Quiero dar las gracias de especial manera a Fran, por guiarme y por transmitirme los conocimientos que me hicieron falta durante todo este camino. Además de mi tutor, ha sabido ser un amigo en el que he podido apoyarme cuando ha sido necesario. Durante estos años en el Grupo de Fotónica, todas las personas que trabajan en él, me han hecho sentir entre amigos desde el primer momento y quiero daros las gracias por vuestro apoyo y amistad día a día. Gracias a María por hacerme las cosas más fáciles y darme la tranquilidad de anticiparse a todos los papeleos necesarios, gracias a José Ramón por compartir tantas horas de trabajo y por hacer que las tareas fueran siempre más llevaderas. Por todo el tiempo que hemos pasado juntos en la oficina y por hacerme cada día mucho más ameno y alegre, gracias a Sebío, Rober, Ruben, Luis, Hanny, Iñaki e Ismail. Estoy muy agradecido a Pedro y a José del laboratorio por todo su apoyo en los proyectos y a Luis y Sebío, otra vez, por dar solución a las dudas de todo tipo que me fueron apareciendo y por su apoyo constante. También quiero dar las gracias a todos los profesores del grupo por ayudarme en todo lo que han podido siempre que lo he necesitado. Y gracias a todos por estar dispuestos a ayudarme desde en aspectos profesionales hasta otros personales, como empujar mi coche cuesta abajo cuando murió la batería.

Quiero dar las gracias a mi madre por inculcarme los valores que han hecho posible que llegue hasta aquí. Mil gracias a mi hermana por darme los ánimos que me han hecho falta en el día a día y a toda su familia de Córdoba.

Gracias a Ester por estar a mi lado todo este tiempo, por saber darme el apoyo que necesitaba en cada momento, por ser la compañera perfecta y saber entender cada aspecto de mí. Gracias por hacer que mis días sean felices.

Me gustaría agradecer a María Jesús, Luis y Alberto, y a toda su familia de Palencia por animarme, estar pendientes de mí en todo momento y hacerme sentir uno más. Por mi situación esto ha supuesto mucho para mí, gracias.

Aunque están en la distancia, no son menos importantes ya que, cuanto más pasa el tiempo, más importantes me resultan. Gracias a mis amigos Michel, Christian y el Pepe. Gracias a Yaniel y a toda su familia por hacer posible todo esto y haberme arropado los primeros momentos, que siempre son los más difíciles.

Dedico especialmente esta tesis a mi padre, que aunque no está aquí para verla, estaría muy orgulloso de mí.

Resumen

El empleo de las diferentes técnicas de Ensayos No Destructivos (END) en la industria para la evaluación de todo tipo de materiales y procesos es cada vez mayor, ya que permite realizar inspecciones sin alterar de forma permanente las propiedades físicas, químicas o mecánicas de los elementos. A partir de la relación del parámetro de temperatura con los procesos de transferencia del calor de los elementos inspeccionados se pueden detectar e identificar de forma temprana los defectos y discontinuidades que puedan aparecer en los materiales y de esta forma prevenir la aparición de fallos en los elementos. Por lo cual, el empleo de las técnicas de medida mediante ensayos no destructivos por Termografía Infrarroja (TI) permite la evaluación y control de estos elementos de forma rápida, sencilla y sin contacto.

Por ello, se estableció como objetivo general de este trabajo de tesis el desarrollo de contribuciones al conocimiento de las diferentes etapas del tratamiento digital de los termogramas, así como su aplicación a problemáticas reales y solución a las carencias detectadas. Estas etapas están constituidas por el acondicionamiento de las imágenes térmicas (preprocesado) como paso previo al tratamiento (procesado) digital de las mismas, donde se mejora la identificación de los defectos presentes en el material, permitiendo de esta forma su posterior análisis y caracterización (postprocesado).

Los campos de aplicación que abarcan estas contribuciones son variados: los Procesos de evaluación e inspección de soldaduras, donde en la etapa de acondicionamiento de los termogramas (preprocesado), se propone el empleo de un método para la estabilización de secuencia térmica, aplicado a procesos de evaluación de soldaduras por arco sumergido. Los Ensayos en materiales compuestos para la industria aeronáutica, donde en la etapa de procesado se propone un método automatizado de cuantificación de la bondad que permita compararlos mediante la definición de parámetros que de forma objetiva valoren las bondades de cada uno de métodos de procesado de imagen térmica para seleccionar, según la aplicación, el método que mejores resultados aporte. Por último, las aplicaciones en el campo de la Detección de contaminantes en el medio ambiente y en el campo de la Industria textil militar, donde en la etapa de postprocesado o análisis se desarrollan contribuciones basadas en modelizaciones, redes neuronales y cambios de espacio de datos que permitan desarrollar soluciones a medidas donde otras técnicas no alcanzan.

Abstract

Different Non-Destructive Testing (NDT) techniques are increasingly used in industry to evaluate all types of processes and materials, since they allow to conduct inspections without permanently altering the physical, chemical or mechanical properties of the elements. On the basis of the relation of the parameter of temperature with the heat transfer processes of the inspected elements, defects and discontinuities that may appear in materials can be early detected and identified, and thus, failures in elements can be avoided. Therefore, the employment of measurement techniques using non-destructive testing with Infrared Thermography enables to evaluate and control these elements quickly, easily and without contact.

For this reason, the overall objective of this thesis project is to make contributions to the knowledge of the different phases of the digital treatment of thermograms, as well as to the application to real problems and to the solution to the detected shortcomings. This process begins with the thermal imaging conditioning (preprocessing) as a previous step to the thermal imaging digital treatment (processing), where the identification of the material defects is improved, thus enabling its subsequent analysis and characterization (post-processing).

The application fields of these contributions are varied: Welding evaluation and inspection processes, where in the thermogram conditioning (preprocessing), the employment of a method to stabilize the thermal sequence, applied to submerged arc welding evaluation processes, is suggested. Testing on composite materials for the aeronautics industry, where in the processing phase, an automated method to quantify the validity is suggested. This method enables to compare them using the parameter definitions that objectively assess the validity of each thermal imaging processing method in order to select the method with better results according to the application. Finally, applications in Detection of pollutant in the environment and in Military textile industry, where in the phase of post-processing or analysis, contributions based on modelling, neural networks and changes of data space enabling to develop solutions to measurements where other techniques are not enough.

Lista de símbolos

Símbolos

$C_p [J/kgK]$	Calor específico
$C_a [J/m^3K]$	Capacidad calorífica volumétrica
$e [Ws^{1/2}/m^2K]$	Efusividad térmica
$f_b [Hz]$	Frecuencia ciega o de corte
$f_s [Hz]$	Frecuencia de muestreo
$k [W/mK]$	Conductividad térmica
$q_{net} [W/m^2]$	Flujo neto de calor
V_{RMS}	Valor cuadrático medio
M_I	Momento central de orden I
N	Número total de imágenes de una secuencia o grado de un polinomio
$Q [J/m^2]$	Energía absorbida por unidad de área
$T [K \text{ ó } ^\circ C]$	Temperatura
$t [s]$	Tiempo
$t_i [s]$	Tiempo de integración de la cámara infrarroja
$w(t) [s]$	Ventana de truncamiento temporal
$z [m]$	Profundidad

Letras griegas

(x,y)	Coordenadas cartesianas
$\alpha [m^2/s]$	Difusividad térmica
Δ	Gradiente (de temperatura, fase o tiempo)
ε	Emisividad
$\rho [kg/m^3]$	Densidad
μ	Momento central de primer orden o valor medio
σ	Desviación típica
σ^2	Momento central de segundo orden o varianza

Subíndices y superíndices

d	Defecto
I	Orden de momento central
max	Máximo
n	Valor enésimo (de frecuencia, amplitud o fase)
o	Inicial
sa	Soundarea (área libre de defectos)
RMS	Valor cuadrático medio

Acrónimos

AE:	Emisión Acústica (<i>Acoustic Emission Testing</i>)
ANN:	Redes Neuronales Artificiales (<i>Artificial Neural Network</i>)
BC:	Negro Carbono (<i>Black Carbon</i>)
DAC:	Contraste Absoluto Diferencial (<i>Differential Absolute Contrast</i>)
DFT:	Transformada Discreta de Fourier (<i>Discrete Fourier Transform</i>)
DPS:	Sustitución Directa de Fase (<i>Direct Phase Substitution</i>)
END:	Ensayos No Destructivos (<i>Nondestructive Testing - NDT</i>)
EOF:	Funciones Ortogonales Empíricas (<i>Empirical Orthogonal Functions</i>)
ET:	Corrientes Inducidas (<i>Electromagnetic Testing</i>)
FFT:	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
FPN:	Ruido de Patrón Fijo (<i>Fixed Pattern Noise</i>)
FPS:	Imágenes Por Segundo (<i>Frames Per Second</i>)
HOS:	Parámetros Estadísticos de Orden Superior (<i>Higher Order Statistics</i>)
IR:	Termografía (<i>Thermal/Infrared Testing</i>)
IT:	Termografía Infrarroja (<i>Infrared Thermography</i>)
MT:	Partículas Magnéticas (<i>Magnetic Particle Testing</i>)
PCT:	Termografía de Componentes Principales (<i>Principal Component Thermography</i>)
PhAC:	Contraste Absoluto de Fase (<i>Phase Absolute Contrast</i>)
POT:	Seguimiento de Punto (<i>Point Tracking</i>)
PPT:	Termografía Pulsada de Fase (<i>Pulsed Phase Thermography</i>)
PT:	Líquidos Penetrantes (<i>Liquid Penetrant Testing</i>)
RT:	Radiografía (<i>Radiographic Testing</i>)
SAW:	Soldadura de Arco Sumergido (<i>Submerged-Arc Welding</i>)
SNR:	Relación Señal-Ruido (<i>Signal to Noise Ratio</i>)
SVD:	Descomposición en Valores Singulares (<i>Singular Value Decomposition</i>)
TSR:	Reconstrucción de Señales Termográficas (<i>Thermographic Signal Reconstruction</i>)
UT:	Ultrasonido (<i>Ultrasonic Testing</i>)
VT:	Inspección Visual (<i>Visual Testing</i>)

INDICE

PARTE I-PRELIMINAR	- 1 -
1 Introducción	- 5 -
1.1. Ensayos no destructivos	- 5 -
1.1.1. <i>Inspección visual (VT)</i>	- 5 -
1.1.2. <i>Líquidos penetrantes (PT)</i>	- 6 -
1.1.3. <i>Partículas magnéticas (MT)</i>	- 7 -
1.1.4. <i>Corrientes inducidas (ET)</i>	- 7 -
1.1.5. <i>Radiografía (RT)</i>	- 8 -
1.1.6. <i>Ultrasonidos (UT)</i>	- 9 -
1.1.7. <i>Emisión acústica (AE)</i>	- 10 -
1.1.8. <i>Termografía infrarroja (IR)</i>	- 10 -
1.2. Tratamiento de señales en ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja.	- 12 -
1.3. Motivación del trabajo de tesis	- 15 -
2 Estado del arte de la termografía infrarroja en ensayos no destructivos	- 19 -
2.1. Situación y tendencias	- 20 -
2.2. Motivación del trabajo	- 29 -
2.2.1. <i>Estabilización de secuencias térmicas</i>	- 30 -
2.2.2. <i>Bondad de las técnicas de procesado en la detección de defectos en materiales diversos.</i>	- 31 -
2.2.3. <i>Detección de contaminantes y elementos en muestras</i>	- 31 -
2.3. Objetivos del trabajo de tesis	- 33 -
2.4. Estructura del documento.....	- 35 -
PARTE II-CONTRIBUCIONES	- 35 -

3 Contribuciones en Preprocesado.....	41 -
3.1. Introducción	41 -
3.2. Método de estabilización de secuencia térmica	42 -
3.3. Resultados	50 -
3.4. Conclusiones parciales.....	54 -
4 Contribuciones en procesado.....	59 -
4.1. Técnicas de procesado	59 -
4.1.1. <i>Contraste Térmico</i>	59 -
4.1.2. <i>Transformadas</i>	60 -
4.1.3. <i>Nuevas técnicas propuestas</i>	61 -
4.2. Estudio de bondad de los procesados	67 -
4.2.1. <i>Relación señal - ruido</i>	67 -
4.2.2. <i>Muestras empleadas en el estudio</i>	68 -
4.2.3. <i>Resultados para diferentes materiales</i>	71 -
4.2.4. <i>Resultados para diferentes geometrías</i>	80 -
4.2.5. <i>Resultados para distinta excitación y enventanado</i>	84 -
4.3. Conclusiones parciales	86 -
5 Contribuciones en Post-procesado y Análisis	91 -
5.1. Introducción	91 -
5.2. Identificación de Negro de Carbono en textiles militares.....	91 -
5.3. Detección de sustancias contaminantes en medio terrestre.	97 -
5.3.1. <i>Formulación del modelo térmico del suelo</i>	99 -
5.3.2. <i>Descripción de las técnicas empleadas</i>	100 -
5.3.3. <i>Redes neuronales artificiales: Aplicación y resultados</i>	104 -
5.3.4. <i>Conclusiones parciales</i>	107 -
PARTE III-CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	103 -
6 Conclusiones y líneas futuras	111 -
6.1. Conclusiones	111 -

6.2. Publicaciones derivadas de la tesis.....	- 113 -
6.2.1. <i>Publicaciones en revistas internacionales</i>	- 114 -
6.2.2. <i>Publicaciones en revistas nacionales</i>	- 114 -
6.2.3. <i>Publicaciones en congresos nacionales</i>	- 114 -
6.2.4. <i>Publicaciones en congresos internacionales</i>	- 115 -
6.3. Líneas futuras.....	- 115 -
PARTE IV-ANEXOS Y BIBLIOGRAFIA	- 108 -
7 ANEXOS	- 119 -
A: Equipamiento Utilizado	- 121 -
B: Estudio de degradación de aceite mineral con termografía	- 125 -
C: Desarrollo de prototipo para la detección de suelos contaminados	- 131 -
C.1. Preámbulo	- 131 -
C.2. Hardware	- 131 -
C.3. Software.....	- 136 -
C.4. Datos de consumo y diagramas	- 142 -
8 BIBLIOGRAFÍA	- 145 -
8.1. Referencias ordenadas numéricamente	- 145 -
8.2. Referencias ordenadas alfabéticamente.....	- 161 -

PARTE I PRELIMINAR

En esta primera parte se presenta una introducción a los ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja. Mediante un análisis comparativo se muestran las soluciones y ventajas que aportan estas técnicas frente a las carencias detectadas en el resto de técnicas de ensayos no destructivos analizadas. Mediante el análisis de las técnicas y métodos de tratamiento de imágenes térmicas obtenidas a partir de ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja activa, incluyendo las carencias detectadas, se han establecido las bases para formular las razones que motivan este trabajo de tesis, así como los objetivos que se pretenden alcanzar. Finalmente se establece la estructura a seguir en este documento de tesis, así como un estudio del estado del arte de la termografía infrarroja como técnica de ensayos no destructivos.

Capítulos:

1. Introducción
2. Estado del arte de la termografía infrarroja en ensayos no destructivos

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El tratamiento digital de imágenes térmicas obtenidas a partir de ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja constituye una de las etapas más importantes de los ensayos termográficos, ya que permite localizar e identificar los posibles defectos y discontinuidades presentes en el espécimen bajo estudio. En este capítulo se presentará una breve introducción a las tres principales etapas comprendidas en el tratamiento de imágenes térmicas (pre-procesado, procesado y análisis), exponiendo en cada una las carencias que han motivado los objetivos definidos para este trabajo. Además se presentará una breve introducción a las principales técnicas de ensayos no destructivos, identificando sus carencias y analizando las posibles soluciones y alternativas que ofrecen los ensayos mediante termografía infrarroja.

1 Introducción

1.1. Ensayos no destructivos

Las técnicas empleadas para la realización de Ensayos No Destructivos de los materiales (END) permiten realizar evaluaciones de todo tipo de objetos, independientemente de su tamaño, forma o material sin alterar de forma permanente sus propiedades físicas, químicas o mecánicas. Las técnicas de ensayos no destructivos son empleadas para medir las características, tipos de material, componentes, presencia de defectos, etc. de los objetos analizados. Para garantizar la correcta realización de las diferentes técnicas de ensayos no destructivos es necesario hacer uso de patrones de calibración y estándares de referencia (ASME, ASTM, AWS, ISO) a partir de los cuales se puedan comparar los resultados obtenidos. La cualificación de los inspectores encargados de realizar estos ensayos se obtiene a través de la ASNT (American Society for Nondestructive Testing), donde la capacitación de los mismos se desarrolla según los niveles I, II y III de cada técnica a desarrollar. En España, el organismo encargado de realizar estas certificaciones es CERTIAEND siguiendo los requisitos establecidos por la norma UNE-EN ISO 9712:2012.

Las técnicas para ensayos no destructivos se pueden clasificar en dos grupos principales según su aplicación y la profundidad del defecto: Técnicas de Inspección Superficial y Técnicas de Inspección Volumétrica.

Técnicas de Inspección Superficial:

- Inspección visual (VT).
- Líquidos Penetrantes (PT).
- Partículas Magnéticas (MT).
- Corrientes Inducidas (ET)

Técnicas de Inspección Volumétrica:

- Radiografía (RT)
- Ultrasonido (UT)
- Emisión Acústica (AE)

En el caso de los ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja, a partir de la técnica empleada pueden aplicarse tanto en inspecciones superficiales como en volumétricas.

1.1.1. Inspección visual (VT)

La técnica de **Inspección visual** (Visual Testing - VT) es la más comúnmente empleada en la industria. Como su nombre lo indica, consiste en la inspección visual del objeto de estudio para evaluar la presencia de discontinuidades en la superficie.

Las inspecciones visuales pueden realizarse de tres formas, por visión directa del objeto, por visión mejorada mediante el empleo de instrumentos ópticos tales como lupas, espejos, endoscopios, etc. y por visión remota haciendo uso de sistemas de visualización asistida por ordenador [1-3].

El empleo de esta técnica permite la inspección preventiva de los elementos analizados, identificando de esta forma algunas de las problemáticas existentes que podrían desencadenar posteriormente en mayores problemas durante el proceso de servicio del objeto de estudio.

A pesar de las diversas ventajas que ofrece el uso de esta técnica (bajo coste, aplicable a cualquier etapa del proceso industrial, etc.), presenta algunas carencias significativas:

- La calidad de la inspección visual depende directamente de la experiencia del inspector y de los conocimientos que se tengan de las características del objeto a analizar.
- La identificación de discontinuidades está limitada a la superficie del objeto.
- La inspección mediante visión directa depende de la agudeza visual del inspector.

1.1.2. Líquidos penetrantes (PT)

La técnica de ensayos no destructivos mediante **Líquidos penetrantes** (Liquid Penetrant Testing - PT), se basa en el fenómeno de capilaridad y consiste en aplicar un líquido de baja viscosidad (líquido penetrante) sobre la superficie a inspeccionar, de esta forma se consigue rellenar las fisuras y discontinuidades presentes en la superficie del material, posteriormente se elimina el exceso de este líquido y se aplica un revelador, generalmente en polvo, de alta absorción que permite identificar los defectos a simple vista o empleando lámparas fluorescentes o de luz negra, dependiendo del método empleado [1, 4-6]. En la Fig. 1. 1 se muestran los pasos principales que componen dicha técnica.

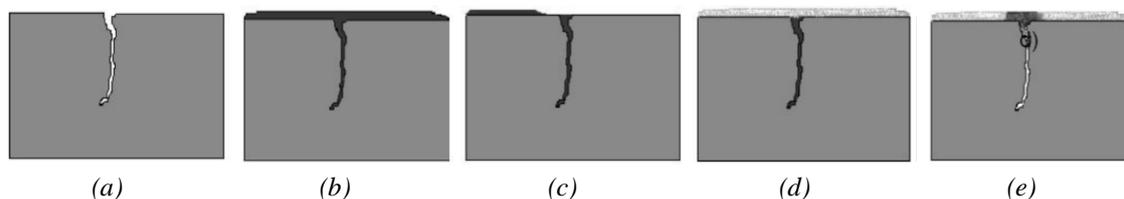


Fig. 1. 1. Composición de la técnica de ensayos no destructivos por líquidos penetrantes. Limpieza previa del material (a), aplicación del líquido penetrante (b), eliminación del exceso del líquido penetrante (c), aplicación del revelador (d) e inspección y evaluación final (e).

El empleo de esta técnica permite la identificación de defectos de forma relativamente rápida y económica mostrando los defectos superficiales del material a simple vista ya sea por contraste o por fluorescencia. A pesar de estas ventajas, esta técnica de ensayos no destructivos presenta algunas limitaciones significativas:

- La identificación de discontinuidades está limitada a nivel de superficie.
- Está condicionada por el tipo de superficie y su composición.
- No permite la inspección de materiales demasiado porosos.
- Requiere una limpieza previa de la superficie.
- La combinación de líquido penetrante y revelador a emplear varía con el método que se emplee, por lo cual, una selección incorrecta de dicha combinación afecta directamente la sensibilidad de los ensayos.

1.1.3. Partículas magnéticas (MT)

La técnica de ensayos no destructivos mediante **Partículas magnéticas** (Magnetic Particle Testing - MT) se basa en el empleo de uno o más campos magnéticos para localizar discontinuidades superficiales y subsuperficiales presentes en materiales ferromagnéticos. Para detectar estas discontinuidades, se aplica un campo magnético a la pieza mediante el empleo de un imán permanente o de un electroimán (dependiendo de las características de la instalación). En las zonas del material que contengan algún defecto se generarán distorsiones del campo magnético o de los polos las cuales atraen las partículas magnéticas aplicadas, ya sea en forma de polvo sobre la superficie o en suspensión.

La técnica de ensayos no destructivos mediante partículas magnéticas presenta un gran número de variantes entre las cuales destacan cuatro métodos principales, el de magnetización por yugo, por puntas de contacto, por bobina y por cabezales[2, 7-9]. Para mejorar el contraste y facilitar la identificación de los defectos en esta técnica se emplean colorantes visibles o fluorescentes.

El empleo de esta técnica permite realizar inspecciones que requieren un grado menor de limpieza previa respecto a las técnicas mencionadas anteriormente. Permite identificar discontinuidades en el material con mayor resolución. Presenta un amplio abanico de métodos que pueden ser aplicados en dependencia de las características presentes en la instalación a inspeccionar. A pesar de estas ventajas, esta técnica de ensayos no destructivos presenta algunas limitaciones significativas:

- Su aplicación está limitada a materiales ferromagnéticos.
- Requiere de una limpieza previa del material a inspeccionar.
- El flujo magnético empleado debe ser perpendicular al defecto.
- Al finalizar la inspección la pieza debe ser desmagnetizada.
- Presenta baja penetración por lo cual la identificación de discontinuidades subsuperficiales es limitada.

1.1.4. Corrientes inducidas (ET)

La técnica de ensayos no destructivos mediante **Corrientes Inducidas** (Electromagnetic Testing - ET) se basa en la inducción electromagnética generada por una bobina de corriente alterna aplicada en un material electro-conductor.

Al acercar la bobina a la pieza, el campo magnético de esta (campo magnético primario) generará un campo magnético de signo contrario (campo magnético secundario) a partir de la corriente eléctrica inducida en la pieza por la bobina. El patrón de flujo de la corriente secundaria (corriente de Eddy) se verá afectado por las discontinuidades presentes en el material, las cuales podrán ser caracterizadas a partir de los cambios en la densidad de la corriente inducida [10-13].

El empleo de esta técnica permite realizar en algunos casos inspecciones de forma automática en elementos de geometría sencilla. Se emplea comúnmente en la inspección de elementos tubulares y puede ser aplicado en inspecciones continuas a altas velocidades. A partir de las corrientes inducidas se pueden realizar caracterizaciones del material inspeccionado [14]. A pesar de estas ventajas, esta técnica de ensayos no destructivos presenta algunas limitaciones significativas:

- La detección de discontinuidades subsuperficiales es limitada y dependerá de la frecuencia de excitación empleada.
- Requiere una limpieza previa del material a inspeccionar.
- Presenta una alta sensibilidad a las características y composición del material, lo cual puede producir ocultaciones o identificaciones falsas de defectos.
- Requiere el empleo de una bobina de prueba la cual variará en dependencia de la pieza a inspeccionar.

1.1.5. Radiografía (RT)

La técnica de ensayos no destructivos de inspección volumétrica mediante **Radiografía** (Radiographic Testing - RT) consiste en la evaluación de materiales mediante la exposición de estos a rayos X o Gamma. La capacidad de penetración de estas radiaciones permite identificar los defectos y discontinuidades presentes en el interior del material inspeccionado. Al atravesar la pieza, la radiación electromagnética (rayos X o rayos Gamma) empleada es adsorbida o atenuada [2, 9, 15, 16]. Estos procesos son proporcionales a las características y composición del material, por lo cual, la información contenida en la parte de la radiación que traspasa el material puede ser registrada permitiendo de esta forma la identificación y localización de los defectos internos presentes en el material.

La técnica de ensayos no destructivos de inspección volumétrica mediante radiografía ha evolucionado de la aplicación tradicional de películas radiográficas a la radiografía digital computarizada permitiendo la realización de ensayos más rápidos y con mayor sensibilidad [17, 18].

Esta técnica permite el análisis de un gran número de materiales, obteniendo la información relativa al interior de los mismos. No obstante, el empleo de esta técnica posee algunas carencias significativas.

- Es una técnica que requiere del cumplimiento de estrictas medidas de seguridad para garantizar que las radiaciones ionizantes empleadas no afecten la salud de los operarios.
- Los elementos a inspeccionar deben ser de fácil acceso puesto que se emplean los dos lados en el análisis.
- Presenta limitaciones a partir de la geometría de la pieza y la orientación de la radiación.

1.1.6. Ultrasonidos (UT)

La técnica de ensayos no destructivos de inspección volumétrica mediante **Ultrasonidos** (Ultrasonic Testing - UT) se basa en la impedancia acústica, la cual depende de la velocidad máxima de propagación del sonido en el material inspeccionado y de la densidad del mismo. Las ondas ultrasónicas se pueden propagar en el material principalmente de forma longitudinal o de forma transversal, aunque también se emplean otros modos de propagación como pueden ser de forma superficial, de barra o de Lamb. Mediante esta técnica se pueden identificar defectos tanto a nivel de superficie como interiores, dependiendo siempre del tipo de palpador y de la frecuencia empleados[1, 19-21]. El empleo de acoplantes (agua, aceite, grasa, glicerina, etc.) permite reducir las pérdidas de energía en la transmisión acústica entre el transductor y la pieza a inspeccionar[22]. La viscosidad del acoplante a emplear estará condicionada por la rugosidad superficial del material a inspeccionar. Los ensayos no destructivos mediante ultrasonidos presentan varios tipos de métodos de aplicación, a partir del tipo de acoplamiento acústico empleado se pueden aplicar el método por contacto (pulso-eco o por transmisión) o el método por inmersión (en tanque, chorro de agua o de rueda).

A partir del tipo de desplazamiento del palpador se pueden aplicar el método manual o el automático. Dependiendo de las características del elemento a inspeccionar y de los objetivos de los ensayos se pueden aplicar otros métodos como puede ser el método por resonancia, utilizado principalmente para la medida de espesores, así como las variantes Phased-Array y TOFD (Time of Flight Diffraction) donde se pueden realizar inspección de alta velocidad y con mayor nivel de precisión[23, 24].

Las técnicas mediante ultrasonidos pueden ser aplicadas para inspeccionar un amplio rango de materiales y procesos industriales permitiendo la identificación de discontinuidades tanto superficiales, subsuperficiales como internas.

La selección de diversos tipos de palpadores permite adaptar la sensibilidad de los ensayos a los requisitos de la inspección y del tipo de material de la pieza, así como a las condiciones del proceso industrial donde se encuentran. No obstante, el empleo de esta técnica posee algunas carencias.

- Requiere del empleo previo de varios tipos de palpadores para poder seleccionar el más adecuado para el objeto bajo análisis.

- Los equipos y accesorios empleados presentan un coste elevado.
- Presenta limitaciones en piezas de geometría irregular.
- Requiere de estándares de referencia para la correcta calibración de los equipos.
- Se requiere de una alta calificación y experiencia de los operadores.
- Requiere el empleo de acoplantes para una mejor detección.

1.1.7. Emisión acústica (AE)

La técnica de ensayos no destructivos de inspección volumétrica mediante **Emisión Acústica** (Acoustic Emission Testing - AE) se basa en la propagación de ondas elásticas transitorias a través del material a inspeccionar generadas a partir de la liberación rápida de energía (carga mecánica, cambio brusco de temperatura o de presión, etc.) a partir del empleo de fuentes externas localizadas con el objetivo de captar la información respecto al movimiento de las dislocaciones internas del material producto de las ondas de tensión generadas. Esta información es captada mediante el empleo de transductores (sensores piezoeléctricos) similares de los palpadores empleados en los ensayos mediante ultrasonidos, pero en este caso funcionan de forma inversa (la emisión acústica captada es transformada en impulsos eléctricos).

Esta técnica permite la detección de los defectos internos o fracturas presentes en el material de forma rápida y temprana, así como el crecimiento y movimientos de estos, con una alta sensibilidad permitiendo realizar inspecciones en tiempo real. Mediante el uso de patrones de referencia se pueden realizar evaluaciones del comportamiento del material para detectar la aparición de fisuras que puedan producirse producto de las cargas de trabajo a las que se somete la pieza durante su explotación [25-30]. Entre sus limitaciones y carencias se encuentran:

- Requiere de una selección previa de las frecuencias de rastreo en función de las discontinuidades que se deseen detectar.
- Debido a su alta sensibilidad los ensayos pueden verse afectados por el ruido de fondo.
- Requiere de operarios con una alta experiencia debido a la complejidad en la interpretación de los resultados así como en el uso del equipamiento y accesorios.
- Los equipos empleados en los ensayos presentan costes relativamente elevados.
- Requiere en muchas ocasiones del empleo de técnicas complementarias ya que esta técnica no permite realizar análisis cuantitativos.

1.1.8. Termografía infrarroja (IR)

La técnica de ensayos no destructivos mediante **Termografía infrarroja (IR)** se basan en la reproducción de imágenes visibles a partir de la luz infrarroja invisible (para el ojo humano) emitida por todos los cuerpos debido a su condición térmica (temperatura superior a 0°K).

Su origen data de principios del siglo XIX, aunque no es hasta la década de los 60 cuando comienza a aplicarse en la medida de transferencia de calor [31, 32]. Producto de la aplicación de esta técnica se obtienen imágenes infrarrojas (termogramas) o fotografías del calor, emitido por los objetos a partir de las cuales se puede obtener su temperatura. Estas técnicas termográficas se clasifican en activas o pasivas, a partir de la existencia o no de fuentes de excitación externas. La termografía activa ofrece la ventaja de evaluar objetos a temperatura ambiente evaluando el valor reemitido por el material previa aplicación de una excitación externa. Como resultado se obtienen termogramas con un patrón térmico que posibilita una caracterización cuantitativa del interior del espécimen. Las técnicas de ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja, y al igual que el resto de técnicas END anteriormente mencionadas, poseen ventajas y carencias. A continuación se muestran las principales carencias que presentan las técnicas END por termografía infrarroja activa.

- Problemas con la presencia de valores diferentes de emisividad en el material.
- Limitaciones en la profundidad de los defectos a detectar.
- Limitaciones y perturbaciones a partir de las pérdidas de calor ocasionadas por los diferentes mecanismos de transferencia de calor (convección, radiación y conducción).
- Limitaciones en las medidas a partir de la distancia entre el sensor IR y la superficie a evaluar debido a la absorción de la radiación infrarroja por la atmósfera en grandes distancias.

A pesar de las carencias mencionadas anteriormente, los ensayos mediante termografía infrarroja ofrecen un amplio rango de ventajas respecto al resto de técnicas de ensayos no destructivos, aportando soluciones alternativas de forma rápida y fiable frente a las técnicas convencionales. Entre estas ventajas encontramos que:

- Permiten la identificación de discontinuidades superficiales y subsuperficiales, obteniendo datos relativamente fáciles de interpretar de forma rápida y sencilla, a diferencia de los ensayos mediante inspección visual (VT).
- La calidad de las inspecciones no siempre estará condicionada por la experiencia del operario, ya que, muchos de los algoritmos de tratamiento de secuencias de imágenes térmicas permiten la identificación de los defectos de forma automática.
- Las técnicas IR no son invasivas y permiten realizar ensayos sin contacto. Estas características dan solución a algunas de las carencias que se detectan en los ensayos mediante líquidos penetrantes (PT), en los ensayos mediante corrientes inducidas (ET) y en los ensayos mediante partículas magnéticas (MT), donde se requiere realizar una limpieza previa de la pieza a inspeccionar y donde, al concluir los ensayos se hace necesario o bien desmagnetizar la pieza (en ensayos MT) o realizar otra limpieza de la pieza para retirar los compuestos aplicados sobre la misma (en ensayos PT).

- Permiten analizar todo tipo de materiales, a diferencia de los ensayos MT, los cuales están limitados a materiales ferromagnéticos.
- En el caso de los ensayos mediante radiografía (RT), las técnicas infrarrojas ofrecen una ventaja significativa, puesto que carecen de exposición a radiaciones ionizantes, aportan mayor seguridad a los operarios e inspectores durante los ensayos y no requieren de zonas aisladas o controladas para su uso. Al permitir realizar ensayos en reflexión, las técnicas termográficas permiten analizar elementos que presentan ciertas limitaciones en sus condiciones de acceso, al contrario de las técnicas mediante RT, que requieren el empleo de ambos lados de la pieza.
- Las técnicas de ensayos no destructivos mediante ultrasonido (UT) requieren del empleo previo de estándares de referencia, varios tipos de palpadores, así como la utilización de diversos equipos y accesorios de alto coste durante los ensayos. Por lo cual, los ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja (IR) ofrecen una solución alternativa a estos, permitiendo obtener buenos resultados de forma más rápida, sencilla y sin contacto. Lo mismo sucede cuando se analizan las carencias de los ensayos emisión acústica (AE), además, en este caso específico, las técnicas infrarrojas permiten realizar análisis cualitativos y cuantitativos sin necesidad de emplear técnicas complementarias, como sucede en los ensayos mediante AE.

1.2. Tratamiento de señales en ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja.

Los ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja se basan en el análisis de la respuesta térmica de un espécimen ante una excitación que puede ser debida a iluminación, ultrasonidos, a corrientes inducidas etc. y que permite la detección de defectos y discontinuidades presentes en el mismo. Como se muestra en la Fig. 1. 2, las técnicas mediante termografía infrarroja están compuestas por la fuente de excitación (ETND activa), un detector de las señales resultantes producto de la excitación, un equipo de registro de los termogramas capturados y los algoritmos y métodos de pre-procesado, procesado y análisis de los resultados medidos [33].

Al realizar ensayos térmicos no destructivos (ETND), independientemente de la técnica que se emplee, los termogramas adquiridos requieren un tratamiento previo para minimizar los efectos de degradación de la señal, ya sea por la propia electrónica empleada en las mediciones, como es el caso de la presencia de píxeles defectuosos o ruido aleatorio, o los de origen óptico, como son los problemas de encuadre de la imagen, o los producidos por las fuentes de excitación empleadas que pueden conducir a calentamientos no uniformes de la muestra, entre otros.

A este proceso de tratamiento de la señal se le llama preprocesado y permite preparar la secuencia de imágenes para la aplicación posterior de los diferentes métodos de procesado, los cuales estarán condicionados por la técnica de excitación empleada durante los ensayos y los objetivos del estudio que se realice.

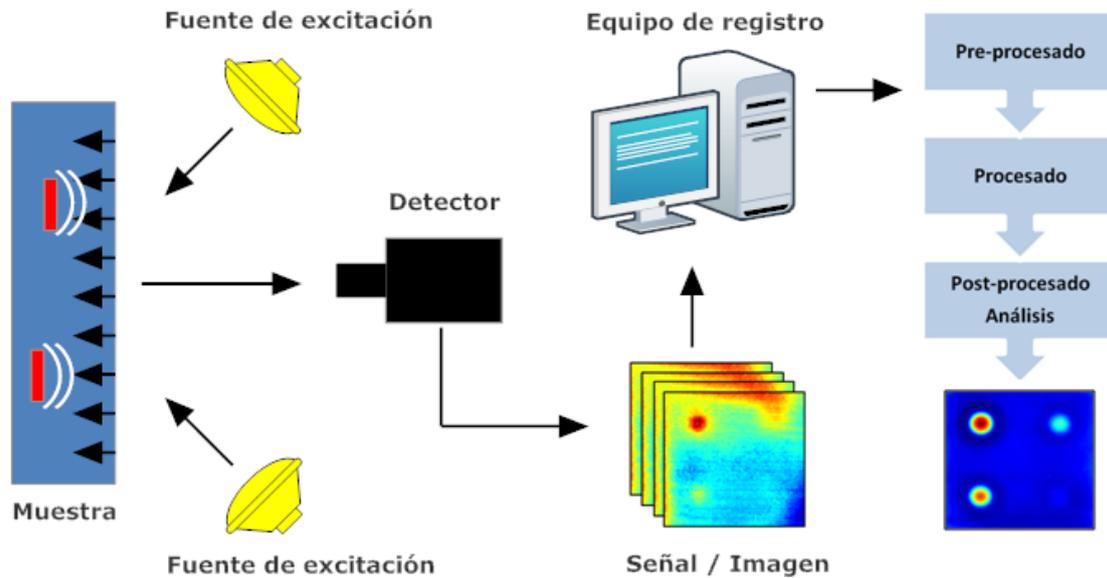


Fig. 1. 2. Diagrama genérico de ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja.

En la etapa de preprocesado, se consigue reducir, no sólo las degradaciones de señal mencionadas anteriormente, sino también, aquellas posibles reflexiones que se puedan producir a partir de las condiciones de contorno existentes, diferencias de emisividad en el material, atenuación atmosférica, etc.

Como primer paso en el preprocesado de la señal, se realiza una regeneración de los píxeles defectuosos. Estos píxeles son aquellos que presentan niveles anormales de intensidad (muy altos o muy bajos) en comparación a los píxeles vecinos y que no proporcionan información útil. Una vez identificados los píxeles defectuosos (por inspección visual o aplicando un algoritmo automático), se corrigen reemplazando su valor por el valor promedio de su vecindad. A continuación, se realiza una corrección de ruido aleatorio (producto de los equipos de adquisición). Esta corrección se puede realizar tanto espacial como temporalmente. En la corrección temporal se realiza un sobre muestreo para preservar la información y en la corrección espacial se realizan promediados lineales de los píxeles vecinos, distribuciones gaussianas, filtros de Butterworth, etc. [34]. Como tercer paso, se realiza una corrección de ruido de patrón fijo (FPN), producido por reflexiones de objetos cercanos, las condiciones de contorno existentes, emisividades, etc. Esta corrección se realiza empleando una serie de imágenes capturadas antes de la excitación, llamadas imágenes frías, de esta secuencia de imágenes se toma una imagen (imagen promedio de la secuencia de imágenes fría) y se sustrae a cada una de las imágenes capturadas durante el ensayo.

Como último paso en el preprocesado se encuentra la corrección del encuadre (vignetting) producto de la óptica de la cámara IR y donde se producen oscurecimientos en las esquinas de los termogramas. Para corregir el encuadre se realiza una calibración de la cámara, a partir de mediciones a un cuerpo negro, tomando termogramas a diferentes temperaturas de su rango de operación. También se pueden emplear otras correcciones en dependencia de la finalidad y características de los ensayos.

En la etapa de procesado y dependiendo de la aplicación concreta en cada caso se pueden emplear una gran variedad de técnicas con el fin de mejorar la identificación de defectos y discontinuidades en especímenes bajo estudio mediante termografía infrarroja [9, 35, 36]. La mayoría de estos algoritmos de procesado han sido desarrollados para ensayos de termografía activa pulsada, ya que ésta es la técnica más comúnmente empleada en ensayos no destructivos. Aunque estos algoritmos pueden modificarse y adaptarse a otras técnicas de inspección térmica. Las técnicas de procesado se pueden clasificar principalmente en tres grupos: Las técnicas que utilizan contraste térmico [37], las técnicas basadas en transformadas [36] y las técnicas que emplean métodos estadísticos [38, 39].

En la etapa de post-procesado, las técnicas de análisis pretenden obtener dos datos, la identificación automática de un defecto y la determinación de la profundidad a la que se encuentra. El primer objetivo se consigue aplicando técnicas conocidas en el mundo de la inspección visual o visión artificial. Las principales son las técnicas de búsqueda de gradientes térmicos en imágenes tales como filtros Robert, Prewitt, Sobel, Laplaciano, gaussiano y Canny.

La detección de la profundidad se basa en la relación entre la profundidad y el momento de aparición del defecto obtenida desde la aproximación unidimensional de la conducción del calor dada por la ecuación de propagación de Fourier resumida en [33, 40]:

$$t \cong \frac{z^2}{\alpha} \quad (1.1)$$

La obtención del valor del instante temporal se puede alcanzar por muchos caminos, (contraste máximo, temperatura de corte, pendiente máxima, FWHM (Full Width at Half Maximum, etc...), en todos los casos las soluciones propuestas toman formas similares y la profundidad viene dada por la expresión (1.2).

$$z = A \cdot t_{max}^{1/2} \cdot \Delta T_{max}^h \quad (1.2)$$

donde z es la profundidad, t el tiempo, ΔT el contraste térmico máximo, y A y h los parámetros obtenidos por regresión.

1.3. Motivación del trabajo de tesis

El empleo de técnicas de medida termográfica en materiales y procesos está condicionado por las características y condiciones propias de los componentes a analizar, así como por los objetivos específicos del análisis. Estas limitaciones influyen de forma directa en la selección de los métodos a emplear en el tratamiento de las imágenes térmicas obtenidas. Aunque en la literatura podemos encontrar un amplio abanico de métodos de tratamiento de señales térmicas, estos no siempre ofrecen solución a todas las carencias existentes. Por ello, en este trabajo de tesis se presentarán contribuciones a los métodos de tratamiento de imágenes térmicas obtenidas mediante técnicas termográficas aplicadas a la evaluación de materiales y procesos que permitan dar solución a las diferentes carencias detectadas.

El empleo de técnicas de ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja en procesos industriales permite la identificación y detección de defectos y discontinuidades que puedan estar presentes en las piezas o componentes de los mismos. La complejidad de las instalaciones y de los procesos en la industria puede limitar el acceso a los componentes, así como también, aportar reflexiones, ruido, atenuaciones, etc.

Estas limitaciones afectan en gran medida a las imágenes térmicas capturadas, reduciendo la posibilidad de identificar correctamente las discontinuidades presentes en el elemento bajo estudio. Para ello, y previo a la aplicación de los métodos de procesado, se hace imprescindible emplear diferentes tipos de tratamiento de la señal térmica (etapa de pre-procesado) que permitan eliminar o reducir estas condiciones. Como se ha mencionado anteriormente, los principales métodos empleados en esta etapa son: la regeneración de píxeles defectuosos, corrección de ruido aleatorio y de ruido de patrón fijo, así como la corrección del encuadre. No obstante, en los procesos industriales pueden aparecer vibraciones y desplazamientos que afecten a las mediciones, impidiendo el correcto procesado y análisis de los datos capturados al no disponer de una imagen estabilizada. Por lo cual, se hace necesaria la incorporación de algoritmos de estabilización de secuencias térmicas a la etapa de pre-procesado con el objetivo de dar solución a dicha carencia.

Como se ha mencionado anteriormente, la correcta selección de los métodos a emplear en el tratamiento de imágenes térmicas constituye un aspecto fundamental a tener en cuenta al aplicar técnicas de medida termográfica. La selección de los métodos de tratamiento de la señal térmica estará condicionada por las características de los materiales y componentes a analizar, así como por los objetivos del análisis. La calidad de los resultados de la evaluación dependerá del método de análisis seleccionado. Por lo cual, en esta etapa, se hace necesario incorporar bases comparativas que permitan identificar los métodos de tratamiento de secuencias térmicas más recomendables para cada caso, incluyendo aquellos en los que se empleen métodos combinados.

El análisis de secuencias térmicas obtenidas mediante medidas termográficas de materiales y procesos en la industria permite desarrollar aplicación mediante las cuales, de forma rápida, sencilla y sin contacto, se pueden determinar, identificar y cuantificar determinados componentes presentes en los materiales sujetos a estudio. Estas aplicaciones permiten incorporar a procesos industriales mecanismos de detección automática de defectos y discontinuidades. La incorporación de nuevas tecnologías y procesos inherentes a la propia evolución de la industria conlleva la aparición de nuevas carencias y problemáticas que requieren de solución. Ocurre lo mismo en los casos en los que se emplean otras técnicas de ensayos no destructivos mediante procesos lentos y costosos. Por ello, se hace necesario desarrollar nuevos métodos de análisis de secuencias térmicas que permitan dar solución de forma rápida y sencilla.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

El presente capítulo pretende mostrar el escenario actual en lo que se refiere a las diversas soluciones existentes en las técnicas y métodos de tratamiento de imágenes térmicas obtenidas a partir de ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja activa. Para ello, se ha realizado un análisis de las publicaciones que recogen las últimas contribuciones científicas, lo cual ha permitido identificar necesidades para continuar desarrollando la termografía infrarroja como ensayo no destructivo y formular los objetivos a perseguir con este trabajo de tesis y en las que se han basado las contribuciones que se presentan. Por último, se establece la estructura a seguir en este documento de tesis.

2 Estado del arte de la termografía infrarroja en ensayos no destructivos

La caracterización de objetos y procesos se puede realizar a través de una amplia variedad de parámetros físicos, tales como, el tamaño, la forma, el peso, etc. Sin embargo, la propiedad física más frecuentemente medida y que posee mayor importancia en multitud de procesos de fabricación y evaluación en la industria es la temperatura, ya que ésta es un subproducto de todo el trabajo relacionado con la actividad eléctrica, mecánica o química de las piezas y componentes industriales. Por lo cual, a través de la inspección, análisis y control de la temperatura basados en los procesos de transferencia del calor se pueden detectar e identificar de forma temprana los defectos y discontinuidades que puedan aparecer en los materiales y de esta forma prevenir la aparición de fallos en los elementos[41].

La temperatura de un cuerpo puede determinarse a partir de la radiación infrarroja que emite su superficie, siempre y cuando dicho objeto posea una temperatura superior al cero absoluto (-273°C). La distribución de esta energía (emitida en el espectro infrarrojo) puede caracterizarse mediante tres leyes físicas: *la ley de Planck*, la cual describe la distribución de la intensidad radiada por un emisor perfecto (cuerpo negro) en función de su temperatura; *la ley de Stephan Boltzmann* donde se introduce el concepto de emisividad como característica superficial de los materiales a partir de la cual se puede ajustar la radiación total emitida por el cuerpo a una temperatura determinada; y *la ley del desplazamiento de Wien*, en la cual se describen los cambios producidos en el espectro de un cuerpo con las variaciones de la temperatura, todo esto se obtiene a partir de la derivada de la función de Planck [41, 42].

En las medidas mediante termografía infrarroja deben tenerse en cuenta tres factores principales que pueden afectar los resultados: la superficie del objeto a inspeccionar, la transmisión de la radiación entre el objeto y el sensor de medida y el propio equipo de medición. *La superficie del objeto a inspeccionar* está condicionada por el hecho de que los cuerpos solo emiten una parte de toda la radiación descrita por la ley de Planck y esta proporción viene determinada por la emisividad. El coeficiente de emisividad varía con la longitud de onda, la temperatura, el ángulo de visión, la forma y composición de la superficie, las condiciones ambientales, etc. *La transmisión de la radiación entre el objeto y el sensor de medida* está condicionada (siempre y cuando las mediciones no se realicen en vacío) por los valores de absorción y dispersión del medio de transmisión. Estos valores varían en dependencia de la distancia entre el objeto y el sensor, las condiciones y características del medio, etc. *El equipo de medición* está condicionado por la calidad y características de sus componentes. Los equipos de medida infrarroja están constituidos por tres partes principales: una parte óptica compuesta por lentes y filtros, un detector (cuántico, bolómetro. etc.) que convertirá la energía infrarroja en una señal eléctrica y por una parte electrónica encargada de amplificar y acondicionar la señal [42].

Además de los factores mencionados anteriormente, para la realización correcta de medidas térmicas deben tenerse en cuenta otros factores como pueden ser las condiciones de contorno existentes, la correcta calibración y corrección de los equipos de medida, el rango espectral de medida, la distancia de trabajo, etc.

2.1. Situación y tendencias

Las técnicas de ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja están en continua evolución. En los últimos años se ha producido un incremento tecnológico significativo no sólo del hardware incorporado en las cámaras termográficas, que ha permitido la entrada en el mercado de dispositivos más económicos y compactos, sino también, en cuanto a los algoritmos y modelos de análisis aplicados en los mismos. Estos últimos, son clave para obtener resultados fiables y precisos, ya que, al realizar ensayos mediante termografía infrarroja aparecen numerosos factores que pueden degradar los resultados medidos. Por lo cual, se hace necesario aplicar a las secuencias de termogramas obtenidas diversos algoritmos que permitan eliminar o disminuir los factores de degradación de la señal obtenida para de esta forma realizar los posibles defectos, discontinuidades y componentes presentes en el material bajo estudio. Así mismo se consiguen identificar estos defectos permitiendo la posterior caracterización de los mismos.

El origen de las técnicas de medida mediante termografía infrarroja se remonta a principios del siglo XIX cuando Friedrich Wilhelm Herschel descubre los rayos infrarrojos en el año 1800. Posteriormente, en 1840 su hijo (John Frederick William Herschel) produce las primeras imágenes infrarrojas empleando el método de evaporografía. En 1880 Samuel Pierpont Langley inventa el bolómetro, detector térmico basado en los cambios que se producen en la conductividad eléctrica producto de la radiación incidente y que años después fue mejorado por Charles Greeley Abbot. A partir de las contribuciones a la teoría de la radiación propuestas por Max Karl Ernest Ludwig Planck en 1900 (ley de Planck), se produjo una aceleración significativa en las tecnologías y procesos por infrarrojos.

En 1917 se producen los primeros detectores fotoconductivos, aportando mayor velocidad y sensibilidad, pero no es hasta 1929 que Marius Czerny facilitara una mejora significativa a la creación de imágenes térmicas [41]. Al terminar la segunda guerra mundial y dado el alto interés que cobraron las aplicaciones infrarrojas, en 1946, la industria militar desarrolló el primer escáner de infrarrojos en línea capaz de crear una imagen bidimensional.

En los años consecutivos se continuaron mejorando y desarrollando los sistemas por infrarrojos, y fueron apareciendo nuevos detectores, como es el caso de los detectores cuánticos (PbS, InSb, HgCdTe). No fue hasta la década de los 60 cuando se comenzaron a comercializar las primeras cámaras termográficas por la compañía Agema, actualmente conocida como Flir.

Quizás los mayores avances en el diseño de sistemas por infrarrojos tuvieron lugar en la década de los 90 con la aparición de conjuntos de plano focal de alta resolución (FPA) con o sin refrigeración [42]. En la actualidad los sistemas de imágenes producen cientos de imágenes por segundo y los sistemas electrónicos de alta velocidad proporcionan un procesamiento de imagen a tiempo real. La rápida evolución de las tecnologías aplicadas en los ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja en los últimos años se ha debido, en gran parte, al alto interés que generan estas aplicaciones en la industria para dar soluciones rápidas y fiables.

Todo esto ha derivado en un mayor número de publicaciones y conferencias permitiendo el desarrollo de nuevos nichos de investigación, así como un constante desarrollo de las aplicaciones ya existentes.

Entre las principales conferencias internacionales que comprende estas temáticas encontramos la conferencia anual Thermosense la cual ha celebrado su última edición (Thermosense XXXVII) en abril de 2015 en el centro de convención de Baltimore, Maryland, Estados Unidos y la conferencia bianual Quantitative InfraRed Thermography (QIRT) la cual organizó su 12^{da} edición en julio de 2014 en el instituto de Mecánica e Ingeniería de Bordeaux, Francia. Entre otras conferencias importantes pero que abarcan los ensayos no destructivos de forma más amplia encontramos la NDT Conference (British Conference on Non-Destructive Testing) del Instituto Británico de ensayos no destructivos que se celebra anualmente y cuya última edición (Edición número 53) ha tenido lugar en septiembre de 2014 en Manchester, Reino Unido; la ECNDT (European Conference on Non-Destructive Testing) que ha celebrado su 11^{ra} edición en octubre de 2014 en Praga, Republica Checa y la WCNDT (World Conference on Non-Destructive Testing) que se convoca cada cuatro años y organizó su 18^{va} edición en abril de 2012 en Durban, Sudáfrica.

También existen muchos grupos de investigación que organizan congresos internacionales de gran interés científico como el AITA (Advanced Infrared Technology and Applications) que se convoca bianualmente en Italia y que organizó su última edición en septiembre de 2013 en Turín; así como el IWASPND (International Workshop on Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Materials) que se celebra cada cuatro años en la Universidad Laval de Quebec y celebró su séptima edición en agosto de 2013. Todos estos encuentros avalan el gran interés científico que generan las temáticas relacionadas con los ensayos no destructivos y en especial los desarrollados mediante termografía infrarroja.

Para demostrar el crecimiento de las técnicas termográficas en las últimas décadas, se presentarán gráficos estadísticos de la evolución temporal de las publicaciones científicas en estas temáticas recogidas por las principales revistas y conferencias internacionales que comprende los END de materiales mediante termografía infrarroja, así como los algoritmos y modelos de análisis aplicados en los mismos.

En la Fig. 2. 1 se muestra la evolución de las publicaciones científicas referidas a ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja. Los datos estadísticos de las publicaciones que se presentan en este apartado han sido recopilados empleando las bases de datos bibliográficas Scopus¹ e Inspec². Se ha analizado la evolución de dos criterios importantes, las publicaciones científicas referidas a ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja (ver Fig. 2. 1) y las publicaciones científicas referidas a técnicas de procesado y análisis de imágenes térmicas (ver Fig. 2. 2).

Los términos de búsqueda empleados para el criterio 1, contenidos en el título, el resumen o en las palabras claves del artículo fueron: "infrared testing", "thermograph" y "thermal imaging". Para el criterio 2, se emplearon términos como: "Infrared image processing", "Infrared thermography" y "Thermogram processing". En ambos casos se evidencia una tendencia claramente ascendente, lo cual indica el crecimiento en la actividad investigadora en estos campos.

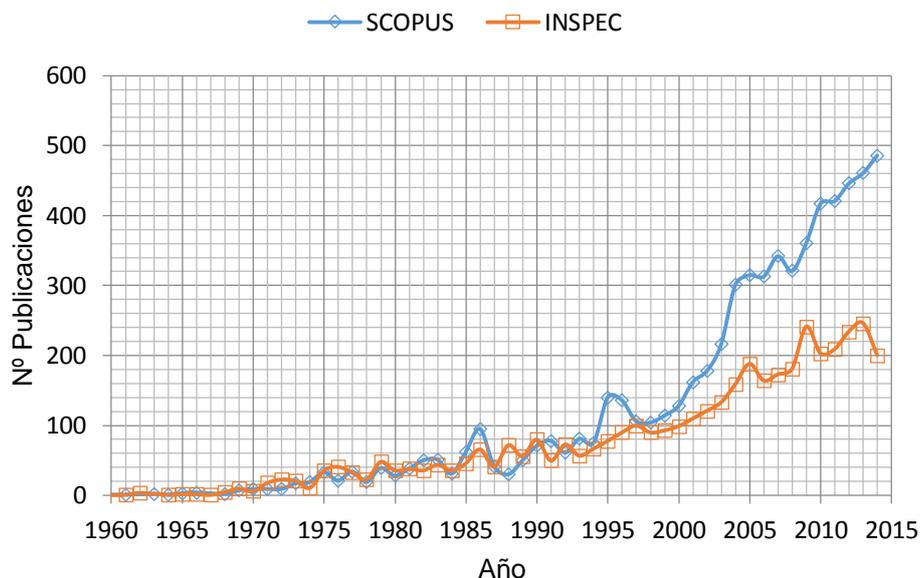


Fig. 2. 1. Publicaciones referidas a ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja.

Como muestran los resultados, en la última década se ha producido un esfuerzo investigador que ha dado lugar a un incremento significativo (hasta un 210%) en el número de publicaciones en el campo de los ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja, así como en técnicas de procesado y análisis de imágenes térmicas.

¹ Scopus es la mayor base de datos de resúmenes, referencias e índices de literatura científica a nivel mundial que comprende las investigaciones realizadas en los campos de la ciencia, la tecnología, la medicina, las ciencias sociales y humanidades. Cuenta con más de 5000 editores, 21915 títulos y 53 millones de publicaciones desde el año 1966. Además, Scopus cuenta con herramientas de búsqueda inteligentes que permiten analizar y visualizar las publicaciones, el perfil del autor y sus datos bibliográficos y establecer alertas para cambios y actualizaciones.

² Inspec es una base de datos bibliográficos en línea de literatura científico-técnica de todas las ramas de la ingeniería, desarrollada por la Institución de Ingeniería y Tecnología (IET). Comprende más de 14 millones de publicaciones desde 1969.

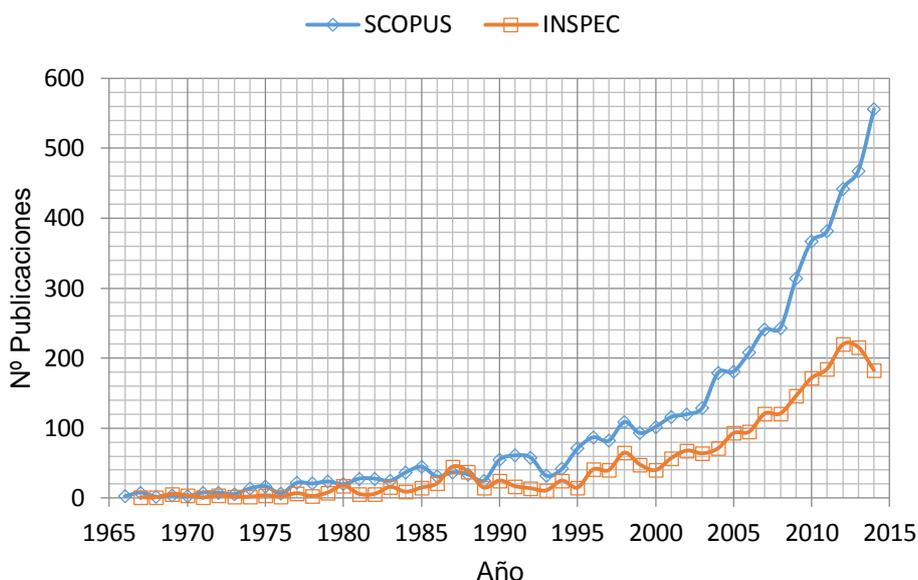


Fig. 2. 2. Publicaciones referidas a técnicas de procesado y análisis de imágenes térmicas.

Dada la transversalidad de las técnicas termográficas, es importante destacar los principales grupos en los que se distribuyen las publicaciones científicas recogidas en las principales conferencias, así como aquellos en los cuales se han intensificado las contribuciones en los últimos años. En la Fig. 2. 3 se puede observar la distribución por grupos de materias de las contribuciones recogidas en las conferencias Thermosense y QIRT en los últimos años (2010-2014). De las 694 publicaciones presentadas durante este periodo de tiempo, el mayor esfuerzo investigador se ha producido en la temática relacionada con las contribuciones en ensayos no destructivos, así como en mecánica de sólidos y fluidos.

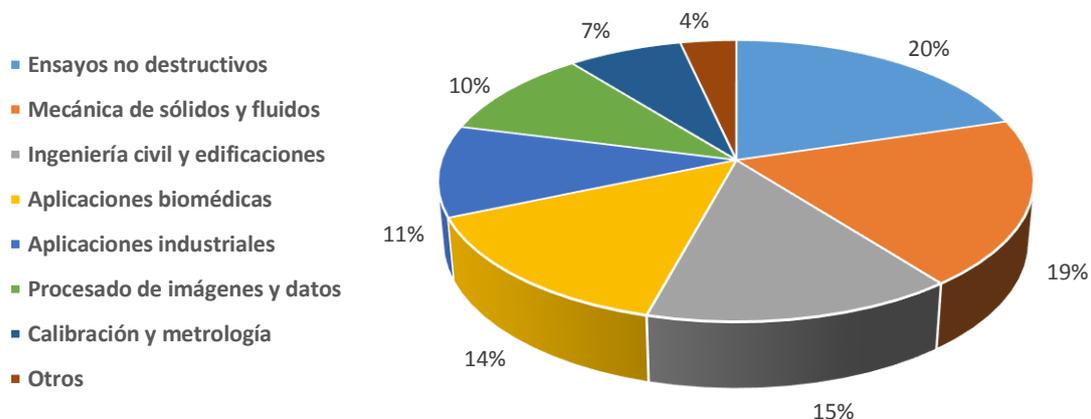


Fig. 2. 3. Distribución de contribuciones por materias publicadas entre los años 2010-2014 en las conferencias Thermosense y QIRT.

El grupo de contribuciones relativas a ensayos no destructivos comprende las investigaciones realizadas en la evaluación e inspección de especímenes de materiales compuesto (CFRP, GRFP, Dyneema, Kevlar, etc.) comúnmente usados en equipamientos militares, aeronáutica, oleoductos, etc. , así como el empleo de diversas técnicas termográficas para la detección e identificación de defectos y discontinuidades en diferentes tipo de materiales, evaluación de daños por impacto, fugas, etc. Dado el aumento producido en los últimos años en el empleo de los materiales compuestos en la industria automovilística, aeroespacial, militar y marina, la evaluación de estos materiales ha cobrado un alto interés, debido a la necesidad de garantizar la calidad de los mismos. Con este objetivo se han generado un gran número de contribuciones que han permitido la inspección y análisis de los diferentes materiales compuestos tanto en producción como en posproducción, para la identificación y detección de defectos, discontinuidades y anomalías presentes en los mismos [43-54]. Dadas las condiciones de explotación a las que son sometidos estos materiales y a las altas prestaciones que se le exigen, se hace importante analizar la respuesta de los mismos frente a impactos y deformaciones, así como a condiciones adversas en las cuales se puede producir la entrada de agua en el interior de los mismos principal causante de daños estructurales [55-60].

Las contribuciones en el área de mecánica de sólidos y fluidos comprenden los estudios de la transferencia de calor en materiales, analizando las propiedades físicas y mecánicas de estos cuando son sometidos a cargas de trabajo, procesos de deformación y fatiga, etc. También incluye el estudio de flujos de calor, procesos termoacústicos, hidrodinámicos y de combustión. Los esfuerzos más recientes en esta temática se han centrado en el estudio de los parámetros y coeficientes relativos a los procesos de transferencia de calor a partir de flujos hipersónicos con el objetivo de evaluar los procesos termodinámicos y los materiales en componentes aeroespaciales, tales como, turbinas, palas, etc. Mediante la medida de temperatura en superficie de los materiales, combinado con los modelados y técnicas de medida convencionales se han podido desarrollar y mejorar los procesos evaluación de dichos componentes [61-67]. Otras contribuciones en esta temática se centran en el estudio y caracterización de los procesos de combustión con el objetivo de aumentar la eficiencia de los mismos y reducir las emisiones. Para ello, es necesario la obtención de parámetros que permitan relacionar las medida de radiación con los procesos de combustión y de esta forma poder identificar y evaluar las fluctuaciones en la combustión producto de las inhomogeneidades presentes en la mezcla [68-70]. Además de los estudios de los procesos de combustión y de transferencia de calor en componentes aeroespaciales, en esta área de contribuciones se presentan diversos estudios relativos al comportamiento termomecánico de los materiales cuando son sometidos a cargas, tensiones y deformaciones. Estos estudios permiten determinar y analizar el comportamiento de los materiales durante los procesos de deformación, fatiga y fallo, a partir de la evaluación de los fenómenos térmicos generados por los mismos. De esta forma se pueden desarrollar herramientas de predicción de comportamientos que permitan detectar e identificar con antelación la aparición de fallos y discontinuidades en los materiales sujetos a altas cargas de trabajo [71-77].

El grupo de publicaciones que comprende las investigaciones realizadas en el ámbito de la ingeniería civil y las edificaciones ha centrado los esfuerzos principales en el desarrollo de nuevos métodos de evaluación y diagnóstico de la eficiencia energética de infraestructuras y edificaciones, así como en la detección e identificación de grietas, defectos y discontinuidades presentes en los materiales que componen los elementos estructurales de los mismos [78-83]. Con la adaptación del sector de la construcción a la estrategia de sostenibilidad económica, energética y medioambiental se requiere garantizar la eficiencia energética de las edificaciones, para ello, se realizan inspecciones de calidad y auditorías energéticas que permitan identificar las problemáticas asociadas (fugas de calor, problemas estructurales, etc.) aun cuando no existen síntomas visibles. Estas problemáticas pueden venir dadas por la presencia de fugas de aire, humedades, puentes térmicos, fugas en los aislamientos en muros, en uniones muro-ventana y muro-techo, creación de bolsas frías, etc. Los estudios de identificación y análisis de estas afecciones están basados en tres mecanismos principales de transferencia de calor: las diferencias de conductividad, el cambio de estado (evaporación) y el fenómeno del transporte de masa [84-89]. Unos de los parámetros de mayor importancia en el cálculo de la transferencia de calor en edificaciones es el coeficiente global de transferencia de calor o transmitancia. El coeficiente de transmitancia térmica es la magnitud que expresa la cantidad de energía que atraviesa, en la unidad de tiempo, una unidad de superficie de un elemento constructivo de caras plano paralelas cuando entre dichas caras hay un gradiente térmico unidad. En los materiales empleados como aislantes térmicos, cuanto menos sea su transmitancia, mejor aislante será. Con esta base, se han desarrollado nuevos métodos para el cálculo de los parámetros de transferencia de calor en edificaciones mediante el empleo de ensayos no destructivos con termografía infrarroja [90-95]. Con el objetivo de prevenir fallos estructurales de los materiales y componentes empleados en edificaciones e infraestructuras se hace necesaria la realización de inspecciones y evaluaciones de los mismos que permitan la detección e identificación de grietas, defectos y discontinuidades presentes en estructuras de hormigón, compuestos cerámicos y uniones, entre otros [96-103].

Las contribuciones en el área de aplicaciones médicas se han incrementado notablemente en los últimos años, esto se debe a la amplia demanda en la aplicación de técnicas infrarrojas en este sector, donde se ha podido comprobar la calidad de los resultados obtenidos, estableciendo estas técnicas como soluciones rápidas y fiables en el diagnóstico de diversas patologías. Entre las aplicaciones biomédicas, destacan los esfuerzos investigadores en el diagnóstico y análisis del cáncer de mama.

Estos se basan en el análisis de la distribución de temperatura en las mamas, donde, a partir del óxido nítrico producido por las células de cáncer que afectan el flujo sanguíneo provocan un aumento de la temperatura en comparación con la temperatura normal de la mama. A partir del análisis de las anomalías en la distribución de temperatura en las mamas se pueden realizar diagnósticos del cáncer de mama que permiten actuar sobre los mismos en etapas tempranas [104-108].

También se han desarrollados métodos de detección temprana en otros tipos de cáncer como es el caso del melanoma, el cual es un tipo de cáncer de piel que aparece cuando las células llamadas melanocitos se convierten en malignas. A partir del análisis de diferentes tipos de pieles (sanas y con melanoma) se pueden identificar las firmas térmicas de las mismas y relacionar los perfiles de temperatura en función de la vascularidad con el objetivo de identificar la presencia de melanomas de forma temprana [109-114]. Otro grupo importante en las contribuciones biomédicas lo encontramos en el estudio de diversas patologías de la piel producidas por varios factores, afecciones producidas por diabetes [115-118], isquemias, úlceras, entre otras afecciones causadas por problemas vasculares [119-122]. Recientemente se han ido desarrollando nuevas aplicaciones para aeropuertos en las que se incluye la identificación de gripe mediante la distribución de la temperatura facial. Estas investigaciones se desarrollaron producto de la epidemia por gripe aviar (H1N1) producida hace unos años y más recientemente por el brote epidémico de ébola de 2014, permitiendo la identificación de personas infectadas antes de su entrada en el país, para de esta forma evitar la aparición de nuevos brotes [123-125].

El desarrollo de investigaciones aplicadas a la industria y al control de procesos tiene como base el análisis de la temperatura como indicador principal para la evaluación y control de componentes, equipos e instalaciones industriales [126]. Entre los principales esfuerzos investigadores en esta área de aplicaciones se encuentran los relacionados con la inspección de instalaciones y equipos mecánicos, instalaciones y componentes eléctricos y procesos de soldadura y uniones [126-130]. La aplicación de ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja en instalaciones, equipos y componentes mecánicos en la industria permite desarrollar nuevos métodos de evaluación preventiva así como la identificación y detección de fallos, defectos y discontinuidades presentes en los mismos (elementos defectuosos, corrosión, fracturas, grietas, deformaciones, desgastes, pérdidas de calor, etc.) [131-135]. Ejemplo de estas evaluaciones a elementos mecánicos destacan las realizadas en motores donde mediante la distribución térmica superficial permite identificar anomalías funcionales, pérdidas de calor y fallos en componentes; evaluación de sistemas de frenado y pastillas de freno en los cuales se pueden producir sobrecalentamientos locales ocasionados por la presencia de defectos, desgastes o un mal funcionamiento de los mismos; inspección de cojinetes donde se pueden identificar desalineamientos, grietas, desgastes y problemas de lubricación; así como en conductos o elementos de unión como es el caso de las válvulas y tuberías [135-139].

Las aplicaciones en instalaciones y componentes eléctricos se basan en el análisis de los equipos y componentes en condiciones de cargas de trabajo normal para establecer parámetros de referencia que permitan identificar los fallos que se pueden presentar. Los fallos más comunes en estos componentes industriales se producen debido a la presencia de corrosión, mal funcionamiento de los contactos, fallos y desgastes en las conexiones y sobrecargas [126-128, 140]. Mediante la evaluación y control de soldaduras se garantiza la calidad de las mismas tanto durante el proceso de soldadura como durante los ciclos de trabajo de los elementos que contienen dichas uniones.

Para ello es importante contar con soluciones que permitan la inspección de estas en línea para la detección e identificación de defectos y discontinuidades que puedan producirse producto de un mal funcionamiento de los equipos de soldadura automatizados, errores del soldador, presencia de corrosión o fallos producto de las condición de carga de trabajo [126, 129, 141-146]. Además de las aplicaciones anteriormente presentadas, en esta área de investigación también se desarrollan contribuciones importantes para dar solución a problemáticas relativas a la evaluación de procesos de fundición, hornos industriales, sistemas de refrigeración, etc. [126, 134, 147].

Las contribuciones científicas en el área de procesado de imágenes y datos térmicos pueden ser aplicadas en todos los grupos de investigaciones anteriormente descritos, de aquí su importancia en el desarrollo de nuevos métodos y algoritmos de procesado y análisis de secuencias de imágenes térmicas obtenidas a partir de ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja que permitan realizar análisis cuantitativos, reducción de datos, reducción de ruido, mejora de contraste, entre otros [35, 54]. Como se ha comentado en capítulos anteriores, los métodos y algoritmos aplicados al tratamiento de imágenes térmicas están compuestos por tres grupos principales: el de pre-procesado, en el cual se realizan los tratamientos previos para minimizar los efectos de degradación de la señal; el de procesado en el cual los algoritmos empleados tienen por objetivo mejorar la identificación de defectos y discontinuidades presentes en el espécimen bajo estudio y por último el de análisis o post-procesado, compuesto por soluciones que permitan obtener principalmente dos datos, la identificación automática de los defectos y la determinación de la profundidad a la que se encuentra. Los principales esfuerzos de investigación de los últimos años se han centrado en el perfeccionamiento y mejora de los algoritmos ya conocidos, el desarrollo de nuevos algoritmos mediante la aplicación de otros métodos estadísticos, así como en el desarrollo de otros métodos de procesado a partir de la combinación de dos o más algoritmos [148-152]. Ejemplo de esto se puede apreciar en la evolución del método de procesado mediante contraste térmico, donde, en su forma más sencilla (*contraste térmico absoluto*) partía de la base de la diferencia entre la temperatura de una zona libre de defectos (temperatura promedio de una región de referencia sana) y una región con defecto (temperatura promedio de una región defectuosa). A partir del método de contraste térmico absoluto se han ido desarrollando mejoras como es el caso del *contraste térmico normalizado*, donde el cálculo del contraste se realiza respecto al valor de temperatura alcanzado en el instante en el que el exceso de calor sobre la superficie alcanza su valor máximo (momento en el que el pulso de calor llega a la superficie del material); *el contraste estándar*, donde el cálculo del contraste se realiza respecto a la temperatura registrada antes de la emisión del pulso de calor y se normaliza a partir de los valores de temperatura en la zona sin defectos anteriormente seleccionada [35, 152]. Otro paso en la evolución del método mediante contraste térmico se presenta mediante el cálculo del *contraste térmico absoluto diferencial (CAD)*, el cual se basa en la solución unidimensional de la ecuación de difusión de Fourier para una onda térmica pulsada, con el objetivo de dar solución a la necesidad de selección a priori de un área de la imagen que corresponda a una zona libre de defectos.

Sin embargo, este método presenta una limitación importante y es la necesidad de identificar con exactitud el instante en el que el pulso térmico alcanza la superficie del material, para dar solución a esta problemática se desarrolló el método de contraste térmico absoluto diferencial interpolado (Interpolated Differentiated Absolute Contrast - IDAC), el cual se basa en la evaluación en cada píxel de las diferentes combinaciones de puntos del perfil temporal de la temperatura, con el objetivo de identificar el instante en el cual el valor de la pendiente rebasa el umbral fijado y de esta forma fijar ese punto del perfil temporal de la temperatura como el comienzo de la detección del defecto [36]. Otra mejora al método por contraste absoluto diferencial es el *CAD modificado por cuádrupolos térmicos*, este método se basa en la transformación de las ecuaciones diferenciales desde el dominio espacio-temporal al dominio de Laplace [153] para dar solución a los problemas de transferencia de calor [154, 155]. Mediante el empleo de este método se puede realizar el cálculo de la respuesta térmica del material mediante su solución directa, así como determinar parámetros de los materiales a partir de su respuesta térmica mediante la transformada inversa [35].

La importancia de mejorar los métodos de tratamiento de la señal térmica mediante contraste térmico ha permitido desarrollar más recientemente nuevos métodos como es el caso del *contraste térmico mediante diferencias finitas* (finite difference thermal contrast : FDTC), la compensación térmica de fondo mediante filtrado (CTFF) y mediante reconstrucción (CTFR), entre otros [156, 157].

Como se ha mencionado anteriormente, la mayoría de los métodos de tratamiento de imágenes térmicas han sido desarrollados para aquellas obtenidas mediante termografía activa pulsada, ya que esta técnica es una de las más empleadas. La evolución de estos métodos de tratamiento ha derivado en los últimos años en el desarrollo de algoritmos en los cuales se modifican o combinan los métodos más conocidos y en los que mejores resultados se obtienen, así como en nuevos métodos de tratamiento de la señal basados en correlaciones estadísticas como es el caso de la termografía por regresión de mínimos cuadrados parciales (Partial Least Squares Regression Thermography: PLSRT).

Este método permite la reducción del volumen de datos analizar obteniendo una nueva secuencia de imágenes menos contaminadas por el ruido de fondo en la que se reduce el efecto no deseado del calentamiento no uniforme de la superficie y sin perder su coherencia física [158]. Una de las ventajas de este método de correlación es que permite el análisis simultáneo de dos matrices, a partir de la relación entre ellas [151, 158, 159].

Como se ha podido apreciar, los métodos empleados para el tratamiento de la respuesta térmica de los materiales sometidos a ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja están en constante evolución y modificación con el objetivo de obtener mejores resultados en la identificación y localización de defectos en materiales, así como para la caracterización, análisis y evaluación de los mismos.

Con menor número de contribuciones pero no menos importantes se encuentra el área de investigación de calibración y metrología, en la cual se desarrollan nuevos métodos y aplicaciones en la calibración de equipos y elementos de medida (cámaras termográficas, cuerpos negros, etc.), estudio de parámetros como la ganancia, la emisividad, rango espectral, tipos de lentes, y muchos otros parámetros metrológicos con el objetivo de garantizar la precisión de las medidas [160-163].

Dada la amplia transversalidad que poseen las técnicas termográficas, en la actualidad se pueden encontrar cada vez más aplicaciones desarrolladas en áreas de investigación muy específicas como son: el arte y el medioambiente. Las aplicaciones desarrolladas para la evaluación e inspección de obras de arte, tales como, pinturas (tanto lienzos como frescos y murales), monumentos y esculturas permiten el análisis y diagnóstico de las mismas con el objetivo de identificar discontinuidades y defectos producidos por el desgaste típico del paso del tiempo o por el efecto sobre estas de las condiciones de contorno en las que se encuentren. Estas evaluaciones se presentan en la actualidad como una herramienta cada vez más empleada en las restauraciones e inspecciones de las obras de arte [149, 164-166].

Las contribuciones en el área medioambiental han permitido desarrollar aplicaciones para la detección y seguimiento de vertidos de hidrocarburos en mar y ríos, la evaluación del contenido de humedad de suelos, monitorización de volcanes mediante el seguimiento de la temperatura superficial de las zonas con alta desgasificación, la inspección de áreas con emisiones de gases tóxicos, el estudio del efecto de microorganismos en plantas, así como aplicaciones empleadas en la geolocalización y cartografía, entre otras [167-172].

Entre los principales editores de estas contribuciones destacan entidades como la editorial Elsevier, the International Society for Optical Engineering (SPIE), el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y el American Institute of Physics (AIP), las cuales abarcan el mayor número de publicaciones internacionales y donde tiene mayor representación el SPIE.

El objetivo de este análisis no ha sido otro que el de indicar cuantitativamente las tendencias de las contribuciones científicas en estos campos. Los criterios de búsqueda pueden variar el número de publicaciones e incluso pueden dejar fuera algunas contribuciones pero el incremento significativo de los últimos años queda claramente evidenciado.

2.2. Motivación del trabajo

A continuación se detallan las principales carencias detectadas en diversas técnicas de tratamiento de señal aplicadas a secuencias de imágenes térmicas que han dado lugar a la motivación para la realización del presente trabajo de tesis.

2.2.1. Estabilización de secuencias térmicas

Los métodos de evaluación y diagnóstico de procesos de soldaduras en línea [173-177] a partir de ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja permiten cuantificar las modificaciones producidas en el material durante el proceso de soldado, identificar defectos tales como impurezas y perforaciones, así como la obtención de parámetros térmicos superficiales a través de los cuales se puede obtener una caracterización térmica del proceso de soldadura [175, 178-181]. Entre los procesos de soldadura por arco se encuentra el de soldadura por arco sumergido (SAW), cuya característica principal consiste en el aislamiento de la zona a soldar a partir del empleo de un mando de flujo granular. Al encontrarse “sumergidos” tanto el arco eléctrico como la zona de soldadura, se consigue mejorar la eficiencia del proceso mediante la reducción del efecto corrosivo producido por el medio en los elementos metálicos aleantes durante el proceso de soldadura. La distribución de temperaturas durante estos procesos de soldadura constituye uno de los parámetros más importantes para la comprensión, predicción y evaluación de las principales problemáticas que pueden producirse: tensiones residuales, distorsiones, zonas afectadas por sobrecalentamiento, perforaciones, entre otras ya comentadas anteriormente [177, 182-185]. Aunque existen en la literatura contribuciones que proponen soluciones termográficas a estas problemáticas mediante el análisis de las soldaduras en fuera de línea (una vez terminado el proceso de soldadura), mediante TI activa aplicando diversos métodos de excitación [180, 186-192], los esfuerzos investigativos de los últimos años han ido más enfocados en el desarrollo de soluciones en línea (incorporadas al proceso de soldadura) de forma que se pueda disponer de resultados cuantitativos del proceso al instante para así dar solución a la problemática detectada [193-198]. A pesar de las ventajas que ofrece la evaluación de soldaduras en línea, el proceso de instalación de la cámara térmica suele estar limitado por las condiciones y características propias del proceso industrial, así como por el resto de equipos y procesos del entorno de trabajo. Esta problemática restringe en gran medida la localización de la cámara térmica en el proceso de evaluación, lo cual condiciona la aparición de efectos negativos que puede llegar a afectar las medidas realizadas. Ejemplo de ello es el caso de la presencia de vibraciones, lo cual afecta directamente las medidas realizadas. La presencia de vibraciones durante la captura de los termogramas establece una problemática importante en la correcta interpretación y análisis de los resultados y afecta directamente la evaluación temporal del proceso de soldadura, ya que para el correcto procesado de los datos se requiere de una secuencia de imagen estabilizada. Dado que la presencia de vibraciones no siempre se puede evitar y para dar solución a esta carencia, se hace necesario la incorporación a la etapa de pre-procesado de las secuencias térmicas, un método de estabilización que permita aplicar posteriormente los diversos métodos de procesado y análisis de secuencias térmicas para obtener mejores resultados.

En la literatura encontramos muchos métodos de estabilización de secuencia de imágenes aplicados a diversos campos [199-203]. Los principales métodos de estabilización se basan en técnicas como: la correlación de emparejamiento [204], detección de características [205] y la correlación de fase [206].

Debido a que las técnicas de correlación de emparejamiento y de detección de características requieren más tiempo de procesado se hace necesario desarrollar nuevos métodos que permitan la obtención de los datos de forma rápida y sencilla. Para ello, y debido a que el objeto a medir es el cordón de la soldadura, el cual tendrá un desplazamiento lineal, un primer paso a aplicar podría incluir un método de seguimiento de punto que permita reconstruir una secuencia en movimiento [207-209] a través de la cual se pueda obtener una nueva secuencia, donde cada elemento en la imagen mantenga su posición.

Dado que la secuencia obtenida a partir del POT presenta muchos datos redundantes y con el objetivo de reducir los datos a analizar se necesitaría de otro paso en el método de preprocesado que permita acondicionar la secuencia térmica para su posterior análisis.

2.2.2. Bondad de las técnicas de procesado en la detección de defectos en materiales diversos.

En la literatura podemos encontrar una gran variedad de técnicas de procesados aplicadas a la detección de defectos en materiales. La selección de los algoritmos de procesado a emplear dependerá de las características y componentes del material bajo estudio, así como del método de ensayo empleado. La correcta selección de las técnicas de procesados a emplear condicionará la calidad de los resultados.

En cada caso, los métodos de tratamiento de la señal térmica presentan bondades y carencias que pueden variar en función de su aplicación, por lo que se hace necesario establecer parámetros comparativos que permitan evaluar la bondad de cada uno a partir de los resultados obtenidos para diversos tipos de materiales. También presenta un igual interés la evaluación de técnicas compuestas de procesado (técnicas híbridas), donde, haciendo uso de las bondades de diversas técnicas ya conocidas, se puedan mejorar y/o simplificar los procesos de identificación de defectos independientemente de las características del material, así como el desarrollo de nuevas técnicas de procesado que ofrezcan alternativas a las comúnmente empleadas y permitan reducir los datos resultantes, manteniendo o mejorando los resultados obtenidos.

2.2.3. Detección de contaminantes y elementos en muestras

En la literatura encontramos muchas contribuciones científicas relacionadas con el análisis térmico de los suelos para la evaluación e identificación de sustancias potencialmente contaminantes presentes en los mismos. El mayor grupo de técnicas empleadas con estos fines son aquellas constituidas por ensayos destructivos (Termogravimetría, Análisis Térmico Diferencial, Cromatografía de gases, etc.) [210-217], las cuales permiten obtener resultados muy precisos pero con altos costes debido al equipamiento empleado.

Entre las técnicas no destructivas más comúnmente empleadas en el análisis de suelos se encuentra la Espectroscopía Infrarroja [218, 219] constituida por varias modalidades y donde destaca la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) [220, 221]. Estas técnicas no destructivas están limitadas por los altos costes de los equipamientos empleados, la obtención de muestras (colección, identificación y conservación de las muestras), así como por el tiempo total requerido para el análisis.

Para dar solución a estas limitaciones, una alternativa sencilla, rápida y más económica estaría dada por el empleo de técnicas de ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja. Como se ha descrito en apartados anteriores, el análisis y evaluación de suelos mediante técnicas termográficas parte de la base del estudio de la distribución térmica superficial del mismo. El análisis de la firma térmica del suelo permite establecer la correlación entre varios parámetros característicos del tipo de suelos y sus componentes y la respuesta térmica de estos. Aunque el desarrollo de contribuciones en esta área han aumentado en los últimos años debido al interés que han generado los resultados obtenidos hasta la fecha, los mayores esfuerzos realizados en el análisis de la firma térmica del suelo han sido los enfocados a fines militares, como es el caso de la detección de objetos enterrados (minas anti-persona) [222-225]. Tomando como base las soluciones desarrolladas en estas publicaciones, se pueden obtener nuevos métodos de análisis termográficos que permitan realizar inspecciones de suelos, rápidas y fiables que den solución a las carencias detectadas en las técnicas no destructivas empleadas en la actualidad para la detección e identificación de sustancias contaminantes en medio terrestre.

El estudio de la capacidad de absorción del negro carbono en el espectro infrarrojo [226-228] ha permitido desarrollar aplicaciones militares para el camuflaje nocturno de los efectivos en el terreno mediante la incorporación de las partículas de negro de carbono en los tejidos o/y fibras que componen los uniformes militares. De esta forma se consigue reducir o eliminar la detección de los soldados mediante sensores infrarrojos ya que estos tejidos permiten absorber el calor corporal humano latente [229]. Los procesos de confección de estos tipos de tejidos están compuestos por diversos tipos de tratamiento para incluir las partículas de negro de carbono en sus fibras [230] y pueden ser por estampación, tintura o incorporado en la fibra.

En el caso de los tejidos tratados por tintura o estampación que incluyen negro de carbono, debido al uso, al lavado y al secado van perdiendo con el tiempo el tratamiento realizado sobre ellos y por lo tanto pierden capacidad de absorber las radiaciones infrarrojas. Aunque existen mecanismos de control donde se evalúan los requisitos de calidad de los tejidos una vez realizados los tratamientos, estos suelen realizarse en el momento inicial de su vida útil y no a lo largo de la misma, mediante la aplicación de tratamientos prolongados de desgastes en los cuales se somete a los tejidos a múltiples ciclos de lavado y secado [231].

Este tipo de evaluaciones resultan poco prácticas y los resultados obtenidos son poco concluyentes, por lo cual se suelen incluir análisis aleatorios a nivel de laboratorio de las fibras producidas. Entre estos, destacan los análisis mediante Espectrometría de reflectancia y Termogravimetría [230, 232, 233]. En la primera técnica se hace empleo de un espectrómetro de reflectancia en el rango espectral visible-infrarrojo cercano (como por ejemplo: 400-1500 nm), donde, a partir del espectro de reflectancia obtenido en cada muestra se establecen los parámetros de relación respecto al perfil de reflectancia de la muestra de referencia previamente establecida.

En el caso del análisis térmico mediante Termogravimetría (TGA), las muestras son sometidas a un flujo de calor controlado y bajo una atmosfera específica, donde se mide la pérdida de masa de la muestra en función de la temperatura, de esta forma se puede cuantificar la composición de los diferentes compuestos presentes en la muestra, incluida la cantidad de negro de carbón.

El empleo de este tipo de técnicas de análisis de negro de carbono en fibra está limitado por el tiempo prolongado que emplean, los altos costes del equipamiento a emplear, así como la necesidad de contar con un proceso previo de selección de muestras para el análisis. Dadas estas carencias presentes en los métodos de análisis empleados en la actualidad para la identificación y evaluación de negro de carbono en fibras textiles surge la necesidad de contar con mecanismos de control periódico que evalúen de forma sencilla y rápida que los tejidos cumplan las especificaciones de absorción en el infrarrojo y de esta forma garantizar que realicen su función de forma correcta. Con este propósito, se propone un procedimiento mediante ensayos no destructivos por termografía infrarroja, donde a partir de algoritmos asociados se analicen los termogramas obtenidos para determinar la presencia de negro de carbono en fibras o tejidos en función de la respuesta térmica obtenida al aplicar excitaciones específicas que aportan calor a la muestra.

2.3. Objetivos del trabajo de tesis

El objetivo principal del presente trabajo de tesis será el de aportar las contribuciones científico-técnicas necesarias, basadas en algoritmos y métodos de procesado de secuencias de imágenes térmicas obtenidas mediante ensayos no destructivos por termografía infrarroja, que permitan evaluar y dar solución a las carencias detectadas en el apartado anterior.

En primer lugar, se plantea como objetivo desarrollar y validar algoritmos y métodos de pre-procesado de secuencias de imágenes que permitan la estabilización de termogramas en procesos de evaluación de soldadura por arco sumergido (SAW). El punto clave de este objetivo radicará en la correcta elección de los métodos a emplear, los cuales deberán permitir que la corrección del desplazamiento se realice de forma rápida y sencilla dado que este solo abarcaría el primer paso en el análisis de la secuencia térmica.

Cada valor de píxel de la imagen compensada deberá corresponder con el mismo punto de análisis para que el método empleado sea válido. Los métodos empleados que incluyan el cálculo de la transformada rápida de Fourier (FFT), como es el caso del método por sustitución directa de fase (DPS) requerirán la posterior aplicación de funciones de ventana (enventanado) que permitan disminuir el error producido por el efecto de las discontinuidades (leakage). Para ello, tendrá gran relevancia la correcta selección de la función de ventana aplicar, por lo cual, se empleará el cálculo del valor cuadrático medio (V_{RMS}) para validar la correcta selección de la función de ventana a emplear. El método final desarrollado se evaluará primero en laboratorio y posteriormente en una aplicación real de soldadura por arco sumergido.

En segundo lugar, se plantea como objetivo la automatización del estudio comparativo de las técnicas de procesamiento de secuencias térmicas obtenidas en ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja activa. Para ello se deberá contar con datos obtenidos para diversos tipos de materiales y con geometrías y distribución de defectos diferentes, así como secuencias sintéticas que permitan validar y comparar en cada caso la bondad de las técnicas de procesado empleadas. Además, sería conveniente incluir en el estudio comparativo, el desarrollo de nuevas técnicas de procesado que ofrezcan una optimización de los resultados obtenidos en comparación con el resto de técnicas aplicadas.

En tercer lugar, se plantea como objetivo la implementación de métodos de análisis de secuencias de termogramas para la identificación de negro de carbono en textiles militares. Este estudio deberá partir del análisis experimental en laboratorio de diversas muestras de tejidos militares que contengan negro de carbono en sus fibras. Será de especial interés realizar un análisis previo de las técnicas a emplear en los ensayos (termografía pulsada, termografía de pulso largo, etc.) para de esta forma seleccionar la más adecuada para la realización de los mismos.

Posteriormente, y a partir de los resultados obtenidos, se realizará un estudio comparativo de evaluación automatizada que permita limitar las aéreas de distribución de los parámetros y de esta forma identificar la presencia de negro de carbono, así como clasificar el tipo de tejido (según el tratamiento aplicado).

En último lugar, se plantea como objetivo la implementación de métodos de análisis de secuencias de termogramas que permitan desarrollar un estudio de viabilidad para la detección de sustancias potencialmente contaminantes en medio terrestre. Este estudio de viabilidad deberá partir de ensayos experimentales a nivel de laboratorio donde se puedan garantizar las mismas condiciones de contorno para todas las muestras y se puedan analizar diversos tipos de contaminantes, con diferentes niveles de concentración (según los establecidos por las normativas vigentes). Para la posterior identificación y clasificación de los distintos contaminantes presentes en las muestras analizadas se deberá contar con herramientas automáticas de clasificación e identificación de distribuciones como por ejemplo, mediante el empleo de redes neuronales artificiales.

2.4. Estructura del documento

En la tabla 2.1 se muestra un resumen de la distribución del presente trabajo. El documento está estructurado en 4 partes.

Parte I – Preliminar	Capítulo 1	Introducción
	Capítulo 2	Estado del arte de la termografía infrarroja en ensayos no destructivos
Parte II – Contribuciones	Capítulo 3	Contribuciones en Preprocesado
	Capítulo 4	Contribuciones en Procesado
	Capítulo 5	Contribuciones en Postprocesado y Análisis
Parte III – Conclusiones y Líneas futuras	Capítulo 6	Conclusiones y líneas futuras
Parte IV – Anexos y Bibliografía	Capítulo 7	Anexos
	Capítulo 8	Bibliografía

Tabla 2.1. Estructura del documento.

La parte I: Preliminar, está compuesta por el capítulo 1, donde se presenta una introducción de los problemas a tratar, y por el capítulo 2, donde se analiza el estado del arte de la termografía infrarroja a través de las contribuciones y tendencias más recientes.

La parte II: Contribuciones, comprende las contribuciones más destacadas al tratamiento de señales en ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja, distribuida en tres grupos principales, Preprocesado (Capítulo 3), Procesado (Capítulo 4) y Análisis (Capítulo 5).

La parte III: Conclusiones y Líneas futuras, está compuesta por las conclusiones finales del trabajo, a partir de las contribuciones expuestas en la parte II, y por las líneas abiertas que surgen producto del trabajo de investigación y mediante las cuales se proponen los trabajos futuros a seguir para darles solución.

La parte IV: Anexos y Bibliografía, está compuesta por las referencias bibliográficas de los métodos propuestos en el trabajo así como por los anexos, los cuales recogen los aspectos de mayor interés y las especificaciones del equipamiento técnico empleado, facilitando la comprensión de los trabajos realizados.

PARTE II CONTRIBUCIONES

En esta parte se recogen las diferentes contribuciones realizadas para dar solución a las problemáticas detectadas presentadas en el capítulo anterior y con el propósito de alcanzar los objetivos marcados, dando lugar a los capítulos que se presentan a continuación. Las contribuciones realizadas en el campo de los ensayos no destructivos en materiales mediante termografía infrarroja comprendidas en estos capítulos se distribuyen en tres grupos: Pre-procesado, Procesado y Análisis.

Capítulos:

3. Contribuciones en Preprocesado
4. Contribuciones en Procesado
5. Contribuciones en Postprocesado y Análisis

CAPÍTULO 3

CONTRIBUCIONES EN PREPROCESADO

En este capítulo se proponen diversos algoritmos y métodos de pre-procesado de secuencias de imágenes térmicas que permitan el acondicionamiento de las mismas para su posterior procesamiento y análisis. Los métodos propuestos en este capítulo han sido aplicados a procesos de evaluación de soldaduras por arco sumergido.

3 Contribuciones en Preprocesado

3.1. Introducción

En la industria, las técnicas de ensayos no destructivos son herramientas esenciales para el seguimiento y la evaluación de los procesos de soldadura con el fin de garantizar una vida segura de los elementos unidos y de identificar los diferentes tipos de defectos que se puedan presentar. La termografía infrarroja aplicada a la evaluación de soldaduras en línea ofrece un control preciso de todo el proceso de soldadura para detectar la aparición de defectos [174]. Cuando la soldadura es inspeccionada utilizando termografía infrarroja, como en muchos procesos industriales, normalmente se producen vibraciones que afectan a las medidas. Esto es debido a las limitaciones existentes en cuanto a la instalación de la cámara térmica. Con el fin de llevar a cabo el análisis térmico del proceso de soldadura, es necesario tener una imagen estabilizada para proceder con el procesamiento apropiado de datos. La estabilización de secuencias y el emparejamiento de imágenes son una parte crucial en la etapa de pre-procesado de estos procesos industriales. Este paso está constituido por un proceso de superposición de imágenes de la misma escena tomadas en diferentes momentos, desde diferentes puntos de vista o por diferentes sensores.

En la literatura, podemos encontrar una gran variedad de métodos de procesamiento de imágenes y secuencias de imágenes con una amplia gama de aplicaciones que se pueden dividir en tres grupos principales [199]: puntos de vista diferentes (multiview analysis) como la teledetección y el mapeo aéreo o por satélite [200], visión estereoscópica e interpolación de imágenes [201], en distintos momentos (multitemporal analysis) como la visión por ordenador y la detección de características [202], y diferentes sensores (multimodal analysis), por ejemplo, el diagnóstico médico y emparejamiento de imagen multimodal [203].

En los principales métodos de emparejamiento de imagen, podemos encontrar: correlación de emparejamiento [204], detección de características [205], correlación de fase [206], el método de mínimos cuadrados [234] y el flujo óptico [235]. El método de seguimiento de punto (POT) se basa en el movimiento de un píxel para reconstruir una secuencia en movimiento [207] obteniendo una nueva secuencia, donde cada elemento en la imagen mantiene su posición.

Para dar solución a las problemáticas anteriores, se propone una modificación del pre-procesado compuesto por el algoritmo de seguimiento de punto (POT- Point Tracking) [207] y el de sustitución directa de fase (DPS-Direct Phase Substitution) [236] que permita obtener una secuencia estabilizada, aplicada a las peculiaridades de la imagen térmica. El método propuesto ha sido validado en laboratorio y en campo.

3.2. Método de estabilización de secuencia térmica

La estabilización de imágenes mediante algoritmos de pre-procesado permite reducir los desplazamientos no deseados presentes en la secuencia capturada productos de vibraciones. Los principales métodos de estabilización de imágenes están compuestos por dos partes: la estimación del movimiento y la compensación del movimiento. La primera parte consiste en la identificación del tipo de desplazamiento que se produce. La correcta identificación del desplazamiento permitirá acotar las variables a emplear, simplificando de esta forma el tiempo requerido para el cálculo del mismo. La segunda parte consiste en la corrección del desplazamiento, empleando los datos de estimación obtenidos en la primera parte. La estimación del desplazamiento se puede aplicar de tres formas diferentes: píxel a píxel, por bloques o por regiones. Si bien es cierto que al aumentar la región de estimación se disminuye el tiempo de cálculo, también se reduce la precisión en la estimación del desplazamiento.

Para validar el método propuesto se parte de una secuencia termográfica obtenida a partir de un proceso automático de soldadura de arco sumergido (SAW-Submerged-Arc Welding), donde la escena no es fija (presencia de desplazamientos en la cámara). La figura Fig. 3.1a muestra una sección de la secuencia obtenida, donde se ha seleccionado un punto de referencia (punto 1), en el cual se puede observar, analizando su comportamiento en el tiempo, y en forma de picos, los errores en las mediciones debido al momento de la cámara causados por las vibraciones (Fig. 3.1b).

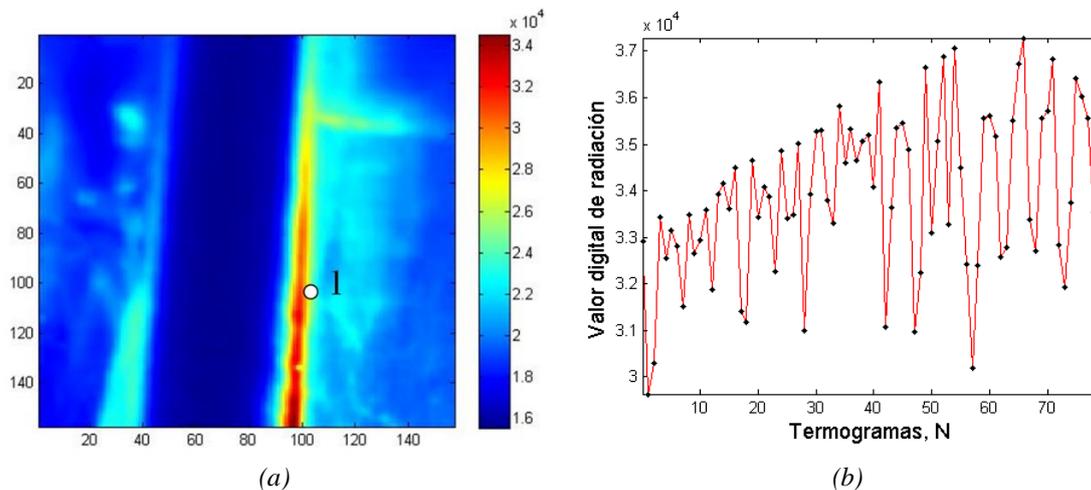


Fig. 3.1. Imagen de la secuencia medida (a), comportamiento en el tiempo del punto seleccionado (b).

En la figura Fig. 3.2 se muestra un diagrama de flujo de los pasos a seguir en el método de estabilización que se propone. Para obtener una secuencia de imagen que compense dichos desplazamientos y donde cada valor de píxel corresponda con el mismo punto de análisis, es necesario aplicar como primer paso, los métodos de acondicionamiento de señal empleados tradicionalmente en la etapa de pre-procesado de secuencias térmicas (regeneración de los píxeles defectuosos, corrección de ruido aleatorio, corrección de ruidos de patrón fijo, vignetting, etc.) y que se han explicado en capítulos anteriores [33].



Fig. 3.2. Diagrama de flujo del método de pre-procesado.

Puesto que los datos de soldadura (secuencia termográfica de un SAW) empleados en este estudio presentan dos tipos de desplazamientos: uno producto del desplazamiento del cordón de soldadura y otro producto de las vibraciones de la cámara, se propone aplicar como segundo paso un método de estabilización basado en los algoritmos de seguimiento de punto (POT- Point Tracking) que permita reconstruir la secuencia térmica a partir del desplazamiento de la cámara respecto a la placa de soldadura.

El objetivo del algoritmo de POT es reconstruir una secuencia en movimiento [237, 238]. Por lo tanto, cada elemento en la imagen mantiene su posición en la secuencia reconstruida de salida [208]. Como muestra el diagrama de bloques (véase la Fig. 3.3), el primer paso consiste en estimar el desplazamiento del píxel entre imágenes. Para ello, es necesario conocer las características de la cámara (longitud focal, velocidad de captura), así como la distancia al objeto.



Fig. 3.3. Pasos para la implementación del algoritmo POT.

La reconstrucción comienza por localizar correctamente el primer termograma en la matriz de salida, es decir, la secuencia reconstruida. Entonces, los termogramas siguientes estarán desplazados respecto al primero en la dirección trazada por la cámara. Por último, las filas y las columnas, que están fuera de la imagen debido al movimiento de la cámara, se pueden rellenar con el valor que tenían en el termograma anterior.

Aunque el algoritmo POT se puede aplicar a cualquier secuencia, en este caso se ha implementado en la reconstrucción de una grabación de una escena de soldadura, con el objetivo de poder representar la evolución temporal de cada punto perteneciente al cordón de soldadura. De esta manera, será posible aplicar procesados y detectar si hay algún tipo de defecto.

En la Fig. 3.4, se muestra la situación de la cámara respecto al cordón de soldadura. La variable α indica la inclinación de la cámara, β es la apertura (en grados) en el eje vertical de la misma y d representa la distancia entre la cámara y el objeto, en este caso el cordón de soldadura.

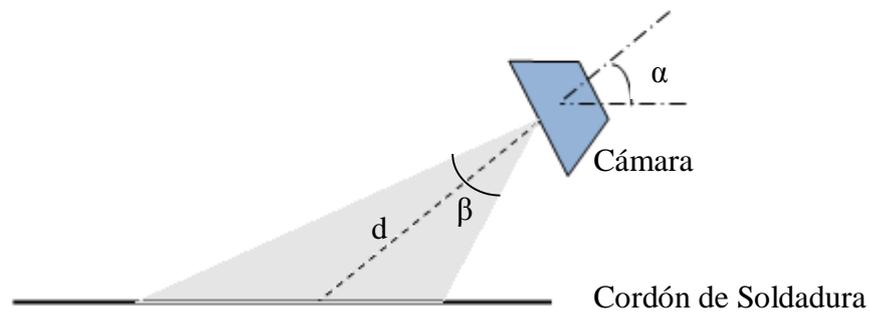


Fig. 3.4. Configuración para la grabación.

En este proceso se identifican cuatro casos, dependiendo de la dirección de desplazamiento de la cámara. La dirección se especifica en función de la velocidad en el eje horizontal, V_x , y la velocidad en el eje vertical, V_y . Los posibles movimientos son los siguientes:

- $V_x < 0 \rightarrow$ De derecha a izquierda.
- $V_x > 0 \rightarrow$ De izquierda a derecha.
- $V_y < 0 \rightarrow$ De arriba a abajo.
- $V_y > 0 \rightarrow$ De abajo a arriba.

Pueden darse dos situaciones: que se mueva la cámara y la placa de soldadura se quede inmóvil o al contrario, que sea la placa de soldadura la que se va desplazando. Puesto que el algoritmo implementado es función de la velocidad de la cámara, en caso de que sea la placa la que se desplace, se entenderá como que la cámara se mueve en sentido contrario al de la placa. Para el cálculo del desplazamiento es necesario conocer el tamaño del área del objeto que abarca cada píxel (IFOV). Para ello, es necesario conocer la distancia física entre píxeles y la focal de la cámara (f), además de la distancia entre la cámara y el objeto, d . (ver Fig. 3.5).

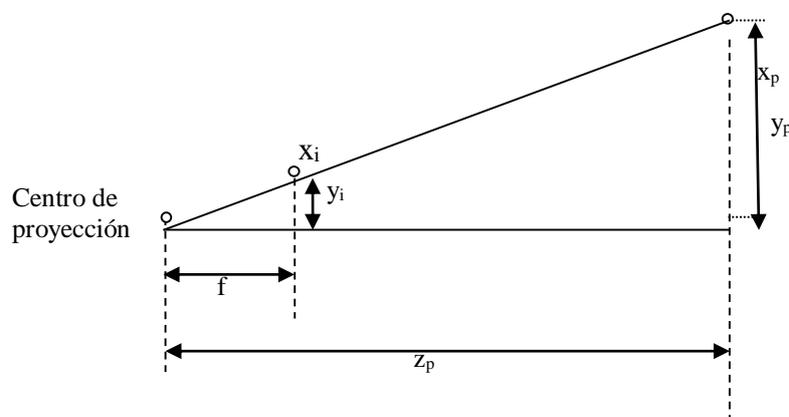


Fig. 3.5. Proyección de un punto [239].

Los píxeles físicos, z_i , y los capturados con la cámara, z_p , siguen las relaciones (3.1) y (3.2):

$$y_i = \frac{y_p}{z_p} \cdot f \quad (3.3)$$

$$x_i = \frac{x_p}{z_p} \cdot f \quad (3.4)$$

Aplicando las expresiones anteriores a la presente situación, mostrada en la Fig. 3.4, se obtiene mediante la ecuación (3.3) el tamaño de la zona representada por un píxel.

$$tam_pixel_{x,y} = \frac{d_{pixel} \cdot d}{f} \quad (3.5)$$

En la expresión anterior d_{pixel} representa la distancia física entre los centros de dos píxeles adyacentes. En este caso, como se trata de píxeles cuadrados, la distancia en ambos ejes es la misma. Debido a la inclinación de la cámara, la distancia al objeto no siempre es la misma. Por ello, se calcula por trigonometría la distancia a la cual se situaría el plano de imagen para cada fila de píxeles en función de la inclinación, α , y del ángulo de apertura de la cámara, β . De esta manera, si la cámara se sitúa perpendicularmente al objeto, en este caso a la placa de soldadura, la distancia al plano de imagen es constante. (ver Fig. 3.6).

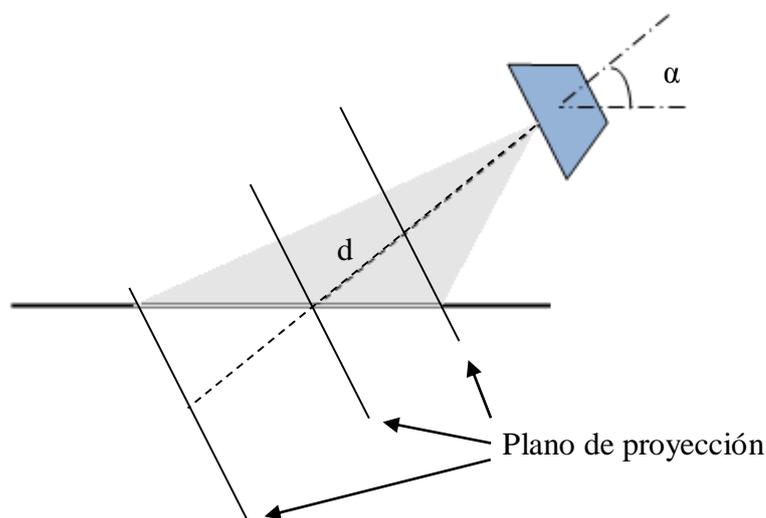


Fig. 3.6. Variación de la distancia del plano de imagen.

Para poder reconstruir la secuencia es necesario saber el desplazamiento efectuado entre imágenes en cada uno de los ejes. Esto se puede obtener utilizando la expresión (3.4).

$$desplazamiento_{x,y} = \left| \frac{v_{x,y}}{v_{cap} \cdot tam_pixel_{x,y}} \right| \quad (3.6)$$

En la ecuación anterior, V_{cap} [imágenes/s] representa la velocidad de captura de la cámara, a partir de la cual se crea una matriz resultado inicializada a cero, donde se almacenará la reconstrucción. Para obtener el espacio que se debe reservar, se tiene que calcular el número máximo de píxeles que se desplazará la imagen. Se pueden estimar el número de filas y columnas totales empleando las expresiones (3.5) y (3.6) respectivamente.

$$\text{filas}_{\text{total}} = \text{filas}_{\text{secuencia}} + \text{round}((\text{n}^\circ \text{ imágenes} - 1) * \text{desplazamiento}_y) \quad (3.7)$$

$$\text{col}_{\text{total}} = \text{col}_{\text{secuencia}} + \text{round}((\text{n}^\circ \text{ imágenes} - 1) * \text{desplazamiento}_x) \quad (3.8)$$

De esta manera, se crea una matriz tridimensional, cuyo tamaño es $[\text{filas}_{\text{total}} \times \text{col}_{\text{total}} \times \text{n}^\circ \text{ imágenes}]$. Dependiendo de los valores de velocidad de la cámara en cada eje, se comprueba de qué caso se trata. (ver Fig. 3.7). Identificado la dirección del desplazamiento, se inicializan a cero las matrices que indican las columnas y las filas desplazadas y el desplazamiento acumulado para cada una de las filas de la matriz. La primera imagen se mantiene y se coloca en la matriz de salida de la siguiente manera:

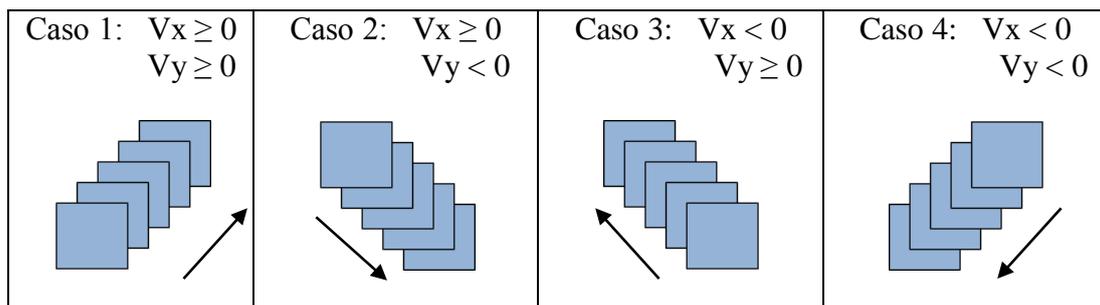


Fig. 3.7. Clasificación de los posibles casos.

- Caso 1: extremo inferior izquierda.
- Caso 2: extremo superior izquierda.
- Caso 3: extremo inferior derecha.
- Caso 4: extremo superior derecha.

De esta forma se reconstruye la secuencia, calculando para cada fila el desplazamiento en ambos ejes. Si el valor obtenido es mayor o igual que la unidad, entonces aumenta el contador de las columnas y las filas con la parte entera del desplazamiento y al desplazamiento acumulado se le resta el desplazamiento realizado. Se desplaza cada una de las filas en la misma dirección y sentido descrito por la cámara, tal como se puede ver en la Fig. 3.8, a partir del número de filas y columnas obtenidos anteriormente. Debido al desplazamiento de la cámara, los valores de la matriz que se encuentren fuera de la imagen se reconstruirán a partir de los valores correspondientes en la imagen anterior.

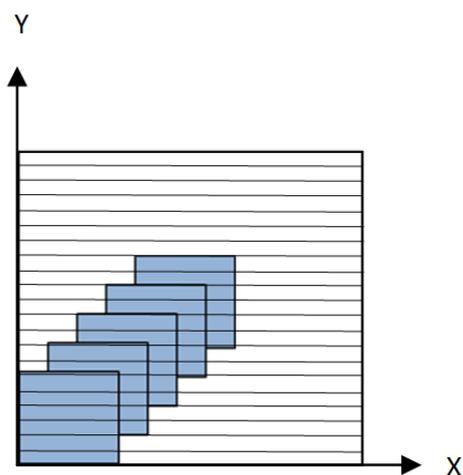


Fig. 3.8. Colocación de las sucesivas imágenes para el caso 1.

Una vez corregido el desplazamiento de la cámara durante el proceso de seguimiento del cordón de soldadura, se procede a aplicar los pasos tres y cuatro (ver Fig. 3.2). En esta parte se propone el empleo de filtros de ventana (enventanado) y de un método de sustitución directa de fase (DPS-Direct Phase Substitution) con el objetivo de corregir el desplazamiento producido por las vibraciones de la cámara.

El método de estabilización de secuencias mediante DPS está basado en la propiedad de traslación de la transformada rápida de Fourier (FFT- Fast Fourier Transform). El espectro de fase de Fourier de una imagen es bien conocido por contener información crucial acerca de la geometría de la imagen, basándonos en esto, se aplica el método de sustitución de fase para establecer la relación geométrica entre dos imágenes cualesquiera de la secuencia térmica [236]. Con este método, cada función de la imagen $f(x, y)$ de tamaño $M \times N$ puede ser representada en el dominio frecuencial por su FFT en la forma de la expresión (3.7) [240]:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} f(x, y) e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (3.9)$$

La FFT de la imagen puede representarse por sus componentes de amplitud ($F(u, v)$) y fase ($\arg(F(u, v))$). La amplitud contiene la información acerca de la intensidad de la imagen en cada banda de frecuencia y la fase (ecuación 3.8) contiene la información acerca de la distribución espacial de los componentes de la frecuencia [236].

$$F(u, v) = |F(u, v)| e^{i \arg(F(u, v))} \quad (3.10)$$

Los resultados del cálculo de la FFT están sujetos a errores mediante un efecto conocido como discontinuidades (leakage).

Para corregir este problema, se deben aplicar a las imágenes las funciones de ventana (enventanado) apropiadas, aunque esto no evita por completo las fugas, puede reducir sus efectos negativos, por eso es necesario aplicar funciones de ventana antes de la FFT [241]. Para reducir el efecto de atenuación generado por la aplicación del enventanado, se hace necesario seleccionar una función de ventana mediante la cual se pueda realizar un filtrado suave de las variaciones de alta frecuencia sin alterar en gran medida los datos. La función de ventana que mejor se ajusta a estas condiciones es la ventana de Tukey [242].

La ventana de Tukey (ver Fig. 3.9), a menudo llamada la ventana de coseno-cónica, evoluciona de una ventana rectangular (Dirichlet) a una ventana de Hann, a medida que el coeficiente α varía de cero a la unidad ($0 < \alpha < 1$) [243, 244]. Para simplificar (ecuación 3.9), se supone que el tamaño de la imagen es cuadrada.

$$w(n) = \begin{cases} 1 & 0 \leq |n| \leq \alpha \left(\frac{N}{2}\right) \\ 0.5 \left(1 + \cos \left[\pi \frac{n - \alpha \left(\frac{N}{2}\right)}{(1 - \alpha) \left(\frac{N}{2}\right)} \right] \right) & \alpha \left(\frac{N}{2}\right) < |n| \leq \left(\frac{N}{2}\right) \end{cases} \quad (3.11)$$

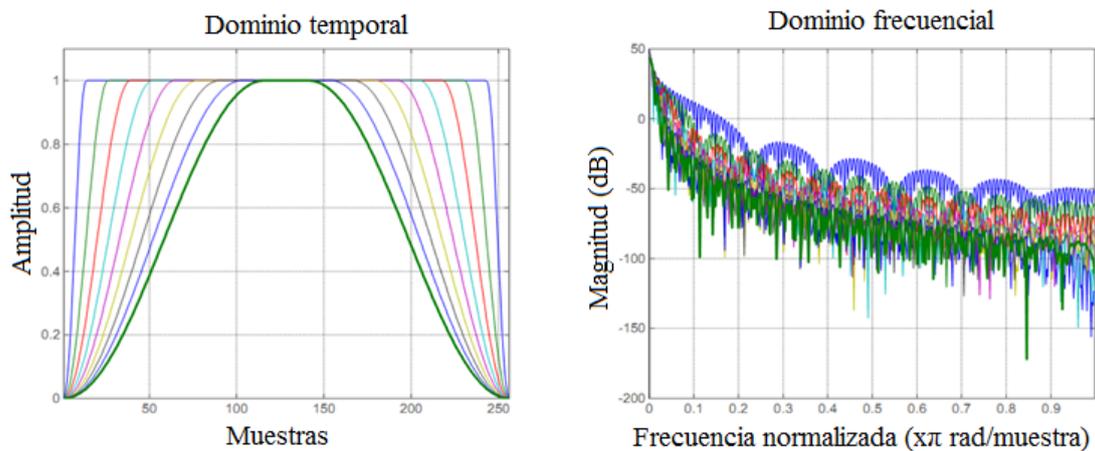


Fig. 3.9. Representación de las ventanas de Tukey para $0.1 < \alpha < 0.9$.

El empleo de la ventana de Tukey para el filtrado de imágenes causa una reducción en el área de la imagen disponible para el análisis. Dado que este paso es sólo el primero de muchos para finalmente procesar la imagen, se hace necesario limitar la reducción del área de la imagen tanto como sea posible. Una solución lógica a esta problemática sería la reducción del valor del coeficiente α , pero dado que la función de Tukey tiende a una ventana rectangular (Dirichlet) a medida que el coeficiente α se acerca más a 0, el efecto generado por la misma sobre los datos de entrada disminuyen. Por esta razón, la ventana estándar de Tukey fue sustituida por una de doble dimensión (por ejemplo, una ventana de 256×256 de Tukey se aplica a una imagen de 128×128), como muestra la Fig. 3.10. Con el fin de cuantificar la optimización de los resultados, se llevó a cabo el cálculo del valor cuadrático medio (V_{RMS}) de la secuencia térmica [245].

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n)} \quad (3.12)$$

donde V_{RMS} es el valor cuadrático medio, una medida estadística de la magnitud de una cantidad variable, $x(n)$ son los datos de entrada y N es el número de fotogramas. La Fig. 3.11 muestra los resultados para una secuencia térmica obtenida en el laboratorio simulando las condiciones de vibración de la cámara para un valor medio del área en el tiempo, el gráfico muestra la optimización del resultado al aplicar una ventana doble con $\alpha = 0,5$.

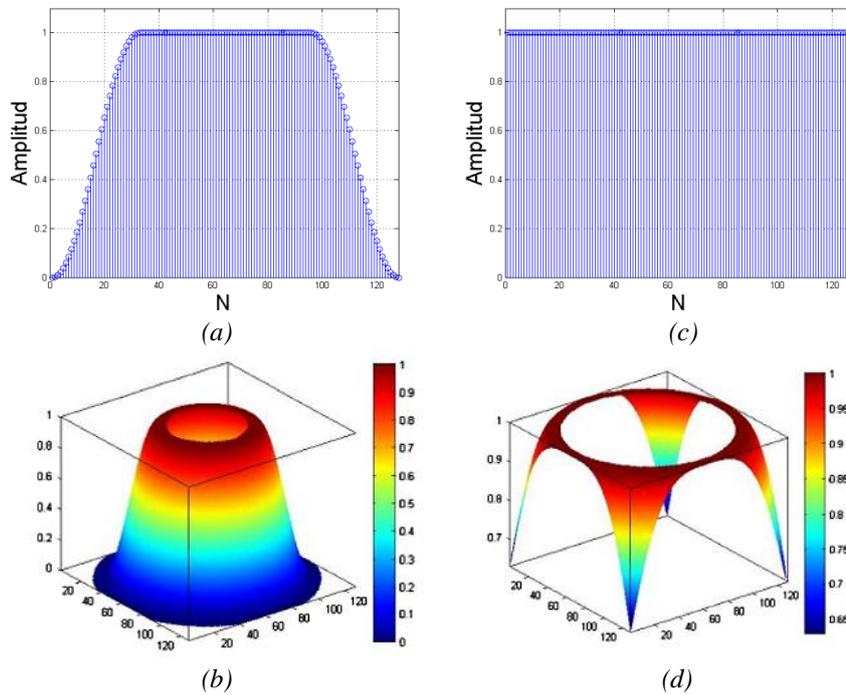


Fig. 3.10. Ventana estándar de Tukey con $\alpha = 0,5$ (a y b) y doble ventana de Tukey con $\alpha = 0,5$ (c y d).

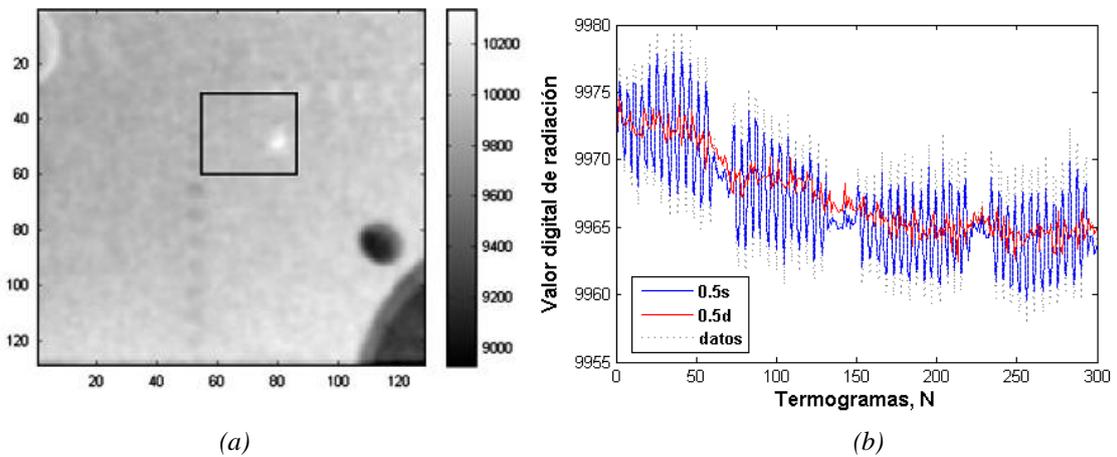


Fig. 3.11. Datos medidos y área seleccionada (a) y los resultados (b) para el enventanado doble con $\alpha = 0,5$ (línea roja) y enventanado simple con $\alpha = 0,5$ (línea azul) y los datos medidos (línea discontinua).

Los valores V_{RMS} de los resultados disminuyen de 4,87 (datos en bruto) a 4,07 (función de ventana simple) y 3,02 (función de ventana doble) mostrando que el uso de una ventana doble ofrece mejores resultados y permite una reducción más pequeña del área de la imagen. Esta nueva configuración (función de ventana doble) se aplicó al mismo análisis comparativo para la variación del coeficiente α en el rango de 0,40 a 0,59 (véase la Fig. 3.12) para encontrar el valor más apropiado para aplicar. Por lo tanto, se emplearon cuatro áreas de enfoque (A1: 80×80 , A2: 70×70 , A3: 60×60 y A4: 40×40) con el fin de comparar los V_{RMS} a partir del valor medio temporal de cada uno.

Estas medidas muestran que se obtuvieron los mejores resultados de la aplicación de una doble dimensión de ventanas para α en el intervalo de 0,49-0,53. En el rango seleccionado, el valor mínimo de α está en 0,51, seleccionando este como el mejor valor obtenido para implementar. La rango de α (0,40 hasta 0,59) fue seleccionado de la experiencia en ensayos anteriores.

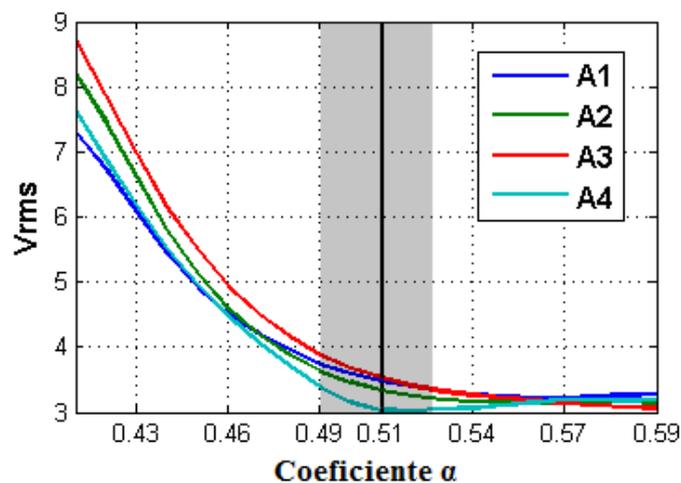


Fig. 3.12. Valores medios cuadráticos (V_{RMS}) para el rango seleccionado de α .

Hay que tener en cuenta que para obtener resultados óptimos, el movimiento de las imágenes no debe ser demasiado grande, ya que podría causar muchos nuevos píxeles que aparecen en la imagen de salida al aplicar el método de DPS. Debido a las características de la función de ventana aplicada a la secuencia antes del cálculo de FFT, no es esencial que el área de interés esté en el centro de la imagen, pero es necesario que esté dentro del rango de la ventana aplicada.

3.3. Resultados

A partir de los procedimientos anteriormente descritos y con el fin de comprobar el método propuesto, se emplearon dos ejemplos de aplicación, uno en laboratorio con una secuencia de termogramas del desplazamiento con una escala y otro de un proceso real de inspección de una SAW, a partir de una secuencia de termogramas obtenida durante dicho proceso.

Para la validación en laboratorio, se aplicó el método DPS a la secuencia obtenida por el método POT. La secuencia original de $128 \times 128 \times 1000$ se redujo a la zona de interés ($72 \times 72 \times 540$) delimitando sólo la parte de vibración para optimizar el tiempo de cálculo. La Fig. 3.13 muestra el algoritmo de la técnica de procesamiento de secuencia empleado en la estabilización de la imagen.

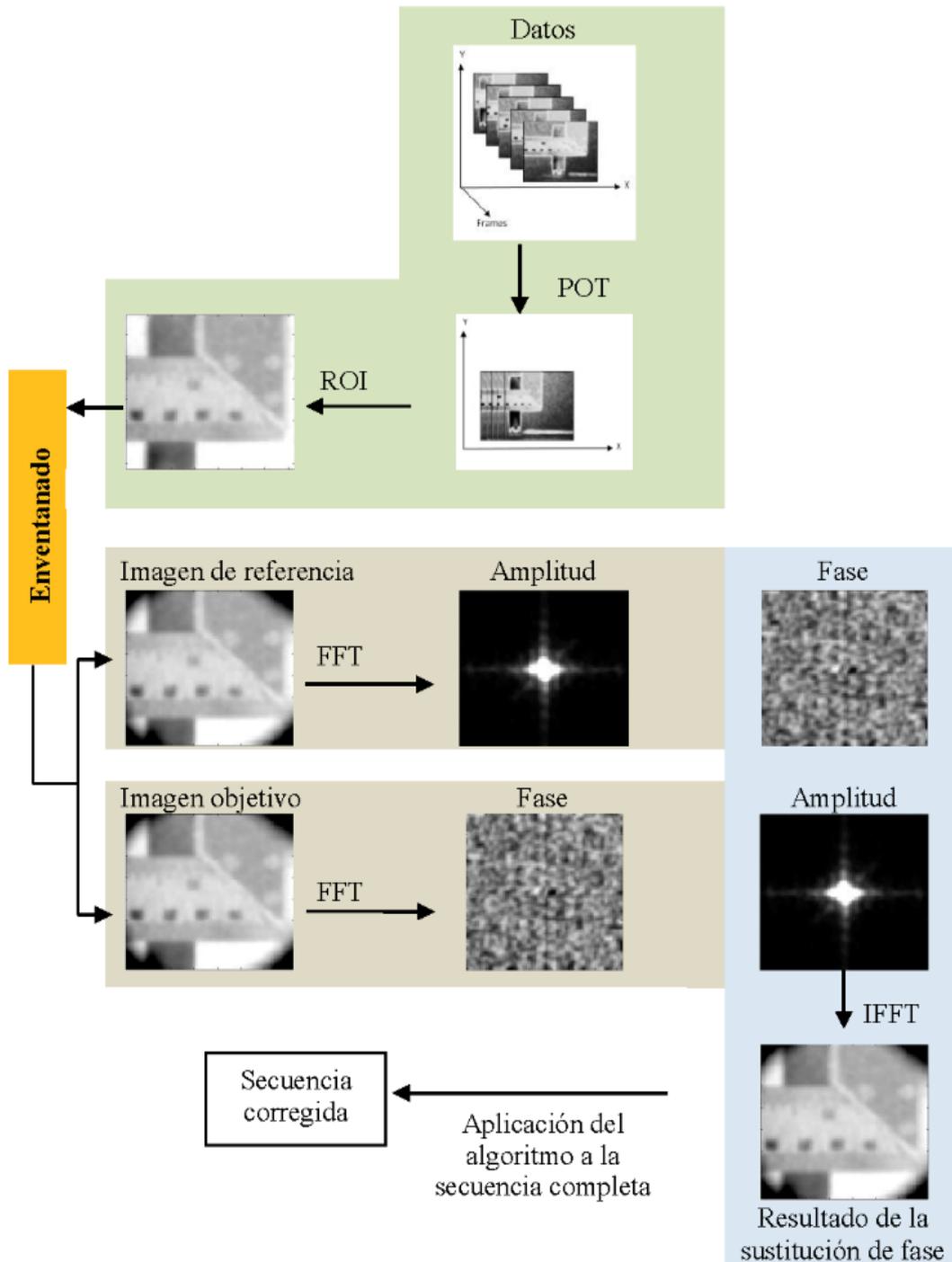


Fig. 3.13. Algoritmo de estabilización de la secuencia.

El algoritmo propuesto está compuesto por tres pasos, en el primero y a partir de la secuencia de simulación de desplazamiento obtenida en el laboratorio, se aplica el método POT para reconstruir la secuencia térmica, en el segundo paso, la función de ventana se utiliza para reducir las discontinuidades antes del cálculo de la FFT y en el tercer paso, se aplica el método DPS para fijar los movimientos de la secuencia térmica debido a las vibraciones simuladas de la cámara.

La Fig. 3.14 muestra el comportamiento en el tiempo de tres puntos de referencia, donde se puede verificar la exactitud de esta técnica de tratamiento para la estabilización de la secuencia (siempre dentro del área de la ventana aplicada).

El error de las mediciones en forma de picos debido al movimiento (véase la Fig. 3.14) se reduce en un 48,77% en el punto 1, 38,90% en el punto 2 y 51,05% en el punto 3. Es necesario destacar que, en este caso (secuencia de prueba obtenida en el laboratorio para la simulación de desplazamiento de la imagen) los valores térmicos no muestran variaciones relevantes porque el objetivo está a temperatura ambiente.

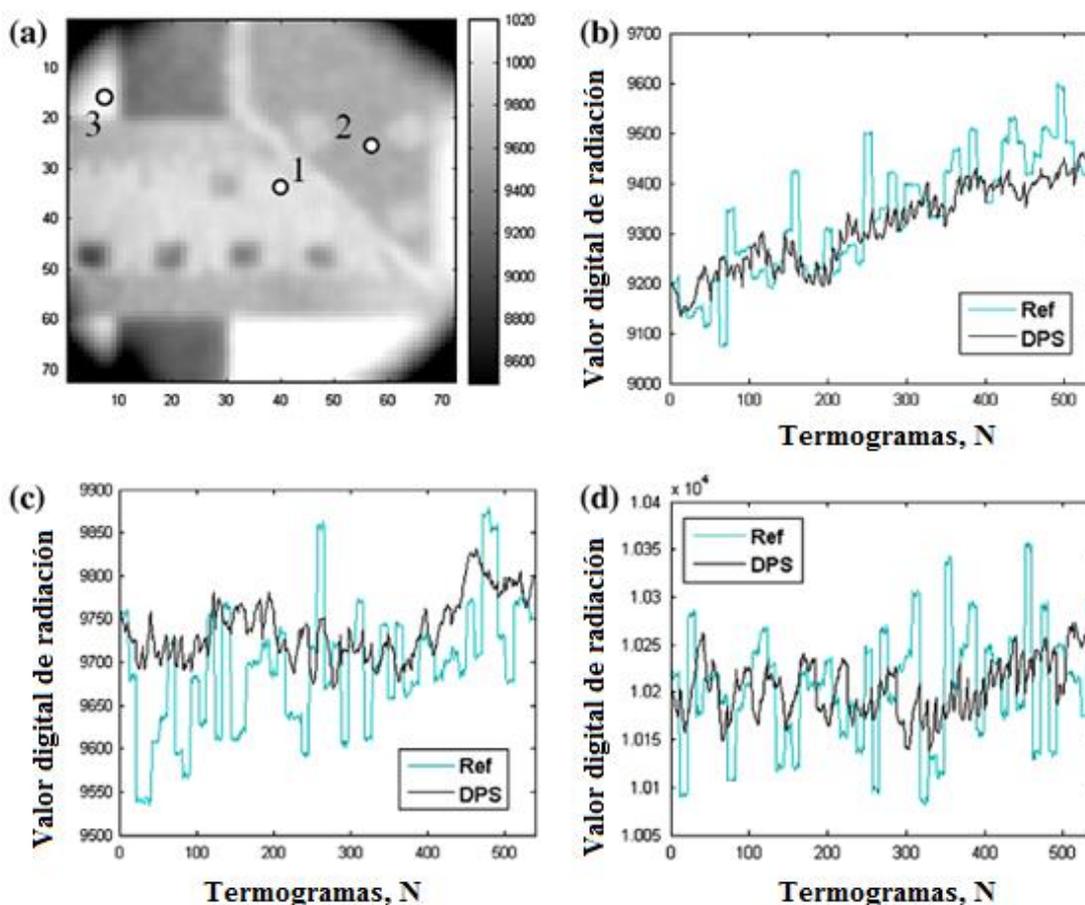


Fig. 3.14. Resultados obtenidos al aplicar el algoritmo de pro-procesado propuesto. Secuencia de imágenes después del pre-procesado (a), resultados comparativos para el punto 1 (línea verde) previo al pre-procesado y (línea de color negro) posterior al pre-procesado (b), y resultados comparativos para el punto 2 (c) y el punto 3 (d).

Los resultados de la validación del método de laboratorio han demostrado que la aplicación del método de estabilización propuesto (aplicando los métodos POT y DPS) reduce significativamente los picos en los valores medidos debido a la vibración, obteniendo una secuencia de imagen corregida. Por lo cual, este algoritmo es posteriormente aplicado a secuencias medidas de la monitorización en línea de soldadura en un proceso de SAW.

En el método de soldadura por arco sumergido (SAW), el extremo del hilo de soldadura, el arco y la soldadura están cubiertos por una capa de flujo granular. Este flujo granular cubre completamente la zona de soldadura del contacto con la atmósfera evitando la oxidación y ayudando a mantener y concentrar el calor en la zona de soldadura lo que permite una penetración mayor.

A partir de la inspección de un proceso de soldadura de dos virolas con el método SAW para la fabricación de componentes nucleares, mediante una cámara infrarroja MR Empiricam con una resolución de 384×288 píxeles y velocidad de captura de 10 fotogramas por segundo, se obtuvo de forma automática una secuencia de 1800 termogramas. La Fig. 3.15 muestra la aplicación del método POT siguiendo el algoritmo anteriormente propuesto.

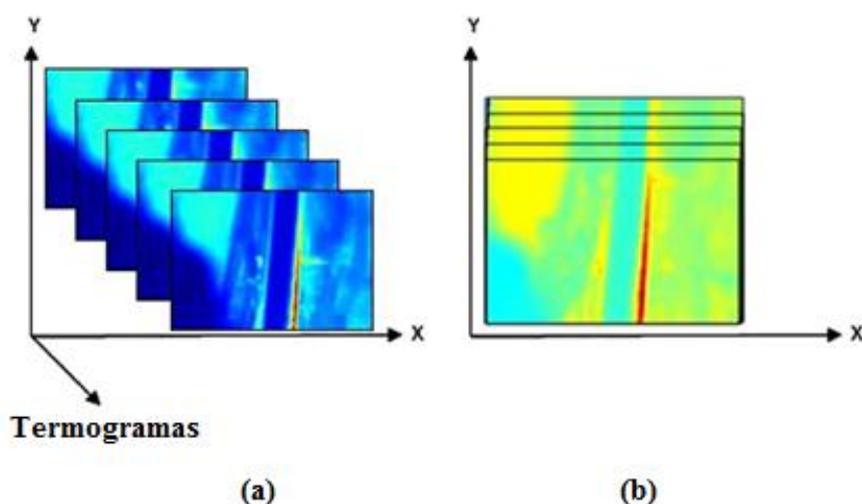


Fig. 3.15. Resultados del POT. Secuencia inicial de movimiento (a) y secuencia reconstruida (b).

Debido al hecho de que la secuencia térmica del proceso de soldadura muestra un movimiento vertical constante (medidas del control de soldadura en línea) al aplicar el método POT, dicho desplazamiento se corrige, obteniendo una secuencia reconstruida donde el objetivo está fijo y sólo se observan los movimientos causados por las vibraciones representados en forma de picos (véase la Fig. 3.16). Este desplazamiento se corrige aplicando el método DPS.

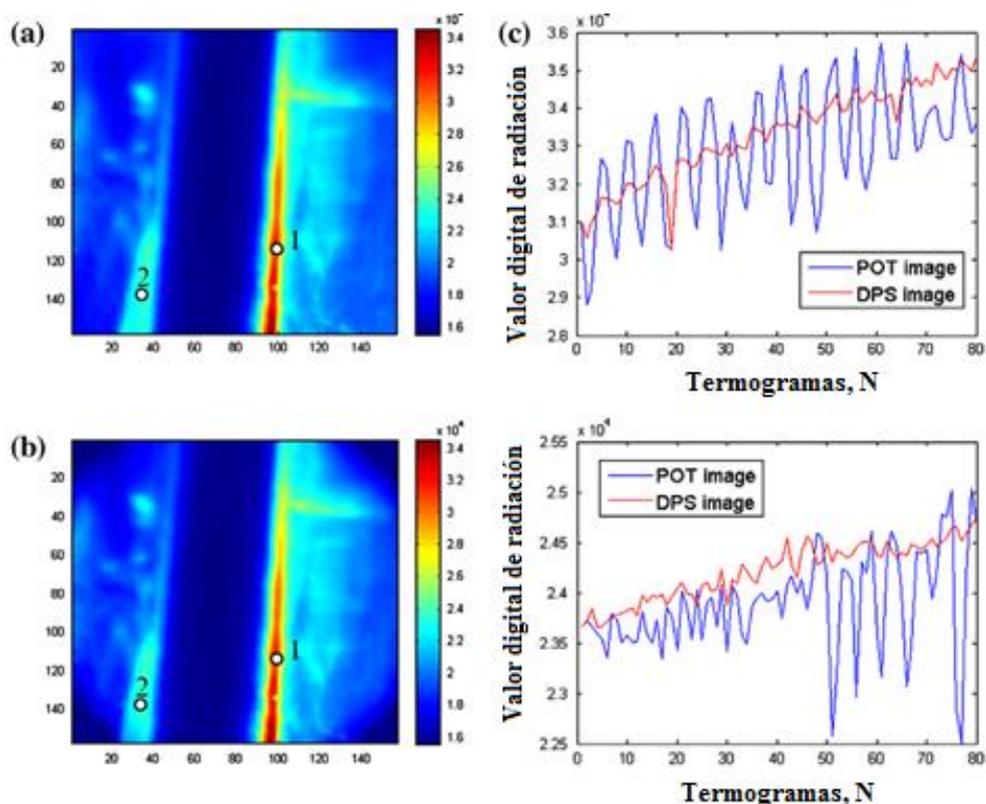


Fig. 3.16. Análisis comparativo entre los datos de la secuencia reconstruida mediante el POT y los resultados del proceso de estabilización final. Imagen reconstruida con el método POT (a), imagen después de aplicar el método DPS (b), resultados comparativos para el punto 1 (c) y resultados comparativos para el punto 2 (d).

En la Fig. 3.16 se muestra un ejemplo del proceso de estabilización de secuencias a partir de la corrección de desplazamientos producidos por vibraciones de la cámara mediante la representación comparativa del comportamiento en el tiempo de dos puntos de referencia de la secuencia. El error en la medición causado por las vibraciones se reduce en un 22,25% en el punto 1 y en un 42.13% en el punto 2 y redonda en una mejora de la medida [246].

3.4. Conclusiones parciales

A partir de los resultados obtenidos para diferentes secuencias térmicas, queda demostrado que la estabilización de secuencias empleando la técnica de pre-procesado propuesta proporciona una reducción significativa de los desplazamientos presentes en la imagen (>20%). A través de la aplicación del método POT es posible analizar secuencias de medidas de procesos en línea. El empleo de la función de ventana con las modificaciones indicadas anteriormente mejora significativamente el proceso de estabilización, principalmente en las zonas con cambios en el patrón de temperatura. El método DPS corrige los movimientos de las imágenes restantes después de aplicar el método POT, obteniendo una secuencia térmica final estabilizada y lista para el posterior análisis térmico.

Los métodos propuestos ofrecen una solución válida para la estabilización de secuencias de imágenes en las evaluaciones no destructivas de procesos de análisis de soldadura en línea. Se demostró que los mejores resultados de los algoritmos empleados se obtienen a altas velocidades de vibración, reduciendo los niveles de ruido hasta en un 43,05%, lo cual permite un acondicionamiento de la señal para su posterior procesado y análisis. Aunque en este caso de estudio el método propuesto ha sido aplicado en la inspección real de soldaduras, puede ser trasladado al resto de aplicaciones industriales que presenten las mismas problemáticas en la estabilización de la imagen.

Publicaciones propias

Las contribuciones presentadas a lo largo de este capítulo han dado lugar a una publicación en revista internacional y otra en revista nacional:

- *Pre-processing techniques of thermal sequences applied on line welding monitoring. QIRT Journal, 2012.*
- *Ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja. Revista de la asociación española de ensayos no destructivos (AEND), 2013.*

CAPÍTULO 4

CONTRIBUCIONES EN PROCESADO

En este capítulo se recogen las contribuciones al procesado de secuencias térmicas obtenidas en ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja activa. Se contribuye en este apartado con una nueva técnica híbrida de procesado, el Contraste Absoluto de Fase, así como con dos técnicas basadas en estadísticos de orden superior. Mediante la aplicación de un método automatizado de cuantificación de la relación señal-ruido (SNR) se comprueba la bondad de los métodos empleados ante distintas situaciones como material y geometría de la muestra, homogeneidad de la excitación y número de termogramas capturados.

4 Contribuciones en procesado

Una vez que las secuencias de imágenes térmicas han sido acondicionadas mediante la aplicación de los diversos métodos de preprocesado disponibles y a partir de las características y peculiaridades de los ensayos realizados, se puede proceder a la etapa de procesado. Esta etapa tiene como objetivo la identificación de defectos y discontinuidades en el espécimen bajo estudio. Para ello, se hace uso de diversos métodos de procesado, entre los cuales destacan: el contraste absoluto diferencial (DAC - Differentiated Absolute Contrast), la transformada pulsada de fase (PPT - Pulsed Phase Transform), el análisis por componentes principales (PCA - Principal Component Analysis) y la reconstrucción de señales termográficas (TSR - Thermographic Signal Reconstruction) [35-37, 42]. Aunque la mayoría de estos algoritmos de procesado han sido desarrollados para ensayos de termografía activa pulsada por ser la técnica más comúnmente empleada en ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja activa, dichos algoritmos pueden modificarse y adaptarse al resto de técnicas de inspección térmica. Mediante las contribuciones desarrolladas en este capítulo se propone el empleo de 3 nuevas técnicas de procesado de secuencias térmicas: 2 basadas en los parámetros estadísticos de orden superior (3^{ro} y 4^{to} orden) y otra basada en una técnica híbrida de procesado, el Contraste Absoluto de Fase (PhAC - Phase Absolute Contrast) en la cual se hace uso de las ventajas de varias técnicas. Realizamos previamente una presentación de las técnicas típicas para posteriormente definir las nuevas técnicas que se proponen y su metodología. Estas técnicas se probarán ante muestras de Kevlar, fibra de carbono CFRP con distintas geometrías y de plexiglás. Así mismo se estudiará su robustez ante excitaciones no homogéneas y diferentes tiempos de captura de secuencia.

4.1. Técnicas de procesado

Las técnicas de procesado se pueden clasificar principalmente en cuatro grupos: Las técnicas que utilizan contraste térmico [37], las técnicas basadas en transformadas [36], nuevas técnicas que utilizan métodos estadísticos [38, 39] y las técnicas híbridas. Algunas de las principales técnicas de estos grupos, así como las nuevas aportaciones, se explican a continuación.

4.1.1. Contraste Térmico

- *Contraste absoluto diferencial (DAC)*

La técnica de procesado empleando el contraste absoluto diferencial (DAC) (4.3) se desarrolló como una solución para la limitación de la técnica de contraste térmico absoluto (4.1), que se define por la diferencia entre las temperaturas de una zona T_d defectuosa y una zona sin defectos T_{sa} [42], donde los resultados obtenidos dependerán de la necesidad de localizar previamente una zona sana.

La técnica de procesado empleando el contraste absoluto diferencial se basa en la solución para una dimensión de la ecuación de difusión de Fourier para una onda térmica pulsada (función delta de Dirac) (4.2).

$$\Delta T(t) = T_d(t) - T_{sa}(t) \quad (4.1)$$

$$T(t) = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \quad (4.2)$$

A partir de las ecuaciones (4.1) y (4.2) se obtiene la expresión para el cálculo del contraste absoluto diferencial:

$$\Delta T_{DAC} = T_d + \sqrt{\frac{t'}{t}} T(t') \quad (4.3)$$

donde t es el tiempo y t' el instante en el que el frente térmico alcanza la superficie del espécimen.

La aplicación de esta técnica de procesado permite modelar los perfiles de evolución en el tiempo de la temperatura de la superficie de la muestra, obteniendo los valores de la energía térmica transferida en cada punto de la superficie y reduciendo los efectos del calentamiento no uniforme de la superficie. La limitación en el proceso de selección de t' se elimina con el método de automatización diseñado para esta técnica (IDAC) [36].

4.1.2. Transformadas

- *Termografía pulsada de fase (PPT)*

La termografía pulsada de fase (PPT – Pulsed Phase Termography) es una técnica de procesado de secuencias de imágenes capturadas mediante termografía infrarroja activa que permite cambiar del dominio temporal al dominio frecuencial [247] la señal de la respuesta térmica de la secuencia, que está definida unidimensional, a partir de la transformada discreta de Fourier (DFT).

$$F_n = \Delta T \sum_{k=0}^{N-1} T(k \Delta t) e^{-i 2 \pi n k / N} = Re_n + i Im_n \quad (4.4)$$

donde Re_n y Im_n son la parte real e imaginaria de la DFT respectivamente, Δt es el intervalo de tiempo entre adquisiciones y n representa los incrementos de frecuencia ($n=0,1,\dots,N$).

Analizando la evolución en el tiempo de la secuencia de imágenes mediante PPT, se aplica la transformada unidimensional de Fourier a cada píxel de la secuencia de

imágenes, obteniendo dos nuevas secuencias de imágenes: amplitud y fase. Las secuencias de imágenes de amplitud (A_n) y fase (ϕ_n) son simétricas respecto a la frecuencia $f = 0$ Hz, lo que hace redundante la mitad de los datos resultantes, lo que permite reducir el tiempo de cálculo necesario para el procesado.

$$A_n = \sqrt{\text{Re}_n^2 + \text{Im}_n^2} \quad , \quad \phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}_n}{\text{Re}_n} \right) \quad (4.5)$$

Entre las secuencias resultantes de la aplicación de la PPT, la secuencia de fases o fasegrama debe destacarse ya que este componente es el menos afectado por los efectos de la degradación de la señal [248] y permite estimar la profundidad de los defectos existentes en la muestra. El cálculo de la profundidad del defecto está dado por la frecuencia ciega, donde, a partir de la definición de contraste de fase, las curvas de la fase del defecto y de la zona sana se cruzan.

- ***Termografía de componentes principales (PCT)***

La técnica de procesado de secuencias de imágenes térmicas que utilizan el análisis por componentes principales se basa en la reducción de la información a partir de la descomposición en valores singulares (SVD – Singular Value Decomposition) para extraer de forma compacta la información espacial y temporal de la secuencia de imágenes mediante funciones empíricas ortogonales o EOF [249, 250]. Antes de aplicar la descomposición, la matriz en 3D de la secuencia de imágenes se transforma en una matriz 2D. Cada secuencia de imágenes se transforma de 3D a 2D. Las columnas contienen la dimensión temporal y las filas contienen la dimensión espacial, por lo que la secuencia completa será una matriz en 3D ($N_x \times N_y \times N_t$ con $N_t =$ número total de imágenes).

$$A = U * R * V^t \quad (4.6)$$

En la matriz A de descomposición, las columnas U representan las funciones ortogonales empíricas (EOF) las cuales describen las variaciones espaciales, y las columnas V_T representan los componentes principales de las variaciones temporales.

4.1.3. Nuevas técnicas propuestas

- ***Parámetros estadísticos de orden superior (3^{ro} y 4^o orden)(HOS)***

Los parámetros estadísticos más comunes son los de medida de la tendencia central y variabilidad, con la media y la varianza como parámetros más representativos. Teóricamente, sólo los 4 primeros parámetros estadísticos tienen una definición física clara en el estudio matemático de la distribución. Se trata de la media, varianza, skewness y kurtosis, lo que corresponde a los momentos estadísticos primero, segundo, tercero y

cuarto respectivamente. La media μ (también conocida como la media aritmética) es el valor medio de una distribución:

$$\mu = E[X] = \frac{1}{p} \sum_{n=1}^P X_n \quad (4. 7)$$

La varianza σ^2 es el segundo momento central de una distribución. Se trata de una medida de dispersión estadística sobre la media de la distribución [251]:

$$\sigma^2 = E[(X - E[X])^2] \quad (4. 8)$$

Los momentos centrales estándar, donde el subíndice que indica el orden de momento, se pueden definir como:

$$M_I = \frac{E[(X - E[X])^I]}{\sigma^I} \quad (4. 9)$$

Así se define skewness como el momento central estándar de orden 3 ($I=3$), que representa una medida de simetría, o más precisamente de falta de simetría de una distribución. La técnica de procesado empleando skewness presenta una gran ventaja ya que permite comprimir toda la secuencia en una sola imagen (skewgrama) que contenga los valores del momento central de tercer orden o la asimetría de la evolución térmica de cada píxel [252]. Así la bondad del ajuste de los datos se determina en referencia a un tipo específico de distribución, destacando la presencia de posibles defectos y faltas de homogeneidad en la muestra. Kurtosis es el momento de cuarto orden ($I=4$) y se caracteriza lo picuda que es una distribución en relación a la forma de una distribución normal. Como la técnica anterior, la técnica de procesado basada en kurtosis también permite comprimir en una sola imagen (kurtograma) la información de la secuencia de imágenes que contenga los valores del momento estadístico de cuarto orden (kurtosis) de la evolución térmica de todos los píxeles de cada imagen de la secuencia original [253].

El momento estadístico de cuarto orden se define como la medición que refleja el grado en el que la distribución alcanza un pico, proporcionando información sobre la altura de la distribución relacionada con el valor de su desviación estándar. De acuerdo con la derivada de una distribución estándar, el valor de kurtosis (K) se clasifica en: mesokúrtica (distribución estándar con $K = 0$), leptokúrtica (alto grado de pico, $K > 0$) y platicúrtica (bajo grado de pico, $K < 0$) [254]. La aplicación de esta técnica de procesado permite estimar los valores de kurtosis para cada píxel, creando un kurtograma con la información de la localización de los defectos eventuales de la superficie y su difusividad térmica.

Los momentos centrales estándar de orden superior, presentan valores grandes debido a los altos términos de potencia involucrados en sus cálculos y, muchas veces, no se puede definir físicamente. Están asociados a la presencia de valores atípicos en la distribución. Para evaluar la capacidad de detección de defecto y para cuantificar el contraste del píxel entre un defecto y un área libre de defectos, se ha simulado una secuencia termográfica con el software Thermocal® (ver Fig. 4. 1).

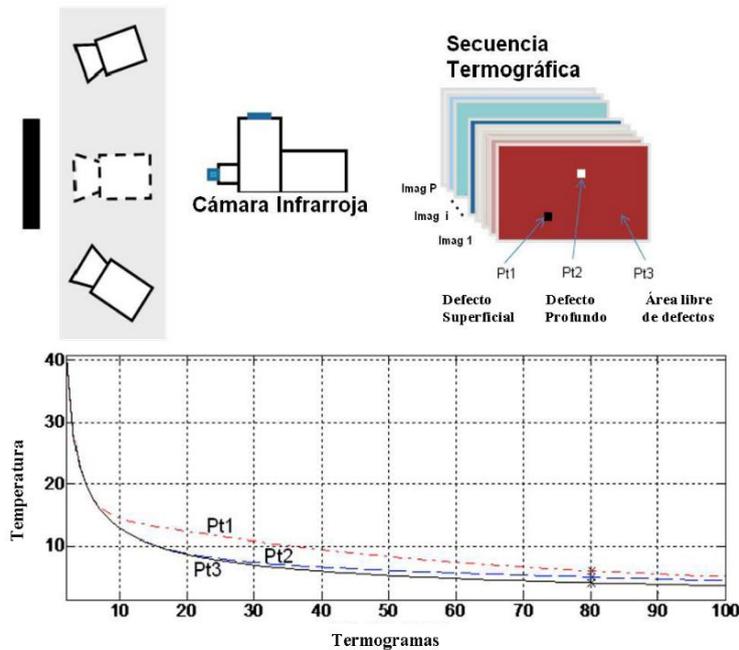


Fig. 4. 1. Situación del sistema de adquisición de datos en termografía pulsada y un ejemplo de 3 parámetros (defectos: Pt1 y Pt2; área libre de defectos: Pt3).

La muestra de simulación contiene 2 defectos definidos con diferentes profundidades y la misma difusión térmica. Los histogramas de la evolución temporal de la temperatura de los píxeles de defecto presentados en la Fig. 4. 2 son fuertemente asimétricos e inclinados a la derecha, es decir el skewness toma un valor positivo. Sin embargo, el área de píxel de fondo (sin defecto) presentará un valor más alto de asimetría estadística que el valor de defecto de píxeles y el mínimo valor de asimetría estadística será obtenido de la zona más superficial del defecto. La medida de la Kurtosis refleja el grado en el cual la distribución es máxima, esto es que proporciona información con respecto a la altura de una distribución en relación con los valores de las desviaciones estándar.

Los histogramas de los píxeles presentados en la Fig. 4. 2 son característicos por un alto grado de apuntamiento (leptokúrtico) especialmente en el área de píxel sin defecto, por lo que su valor de Kurtosis será mayor que los píxeles de defecto. El quinto momento del orden central (FCM) no tiene reflejado su valor en las características del histograma y está relacionado con los valores atípicos de la distribución, los cuales no existen en la simulación de la secuencia termográfica. Por ejemplo, en un secuencia termográfica real,

el valor de FCM nos dará el alineamiento de las fibras de la muestra como CRPF o piezas de fibra de vidrio.

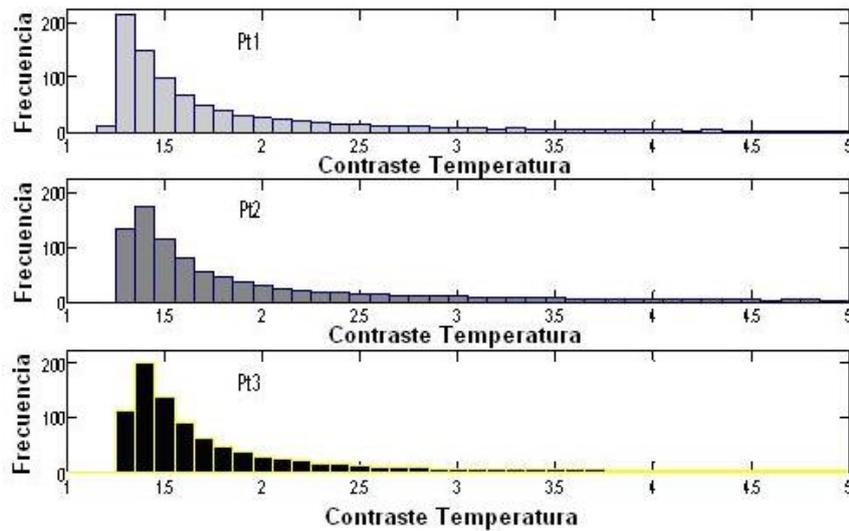


Fig. 4. 2. Histograma de tres puntos: Pt1 (defecto de profundidad = 1mm); Pt2 (defecto de profundidad = 1.5mm); Pt3 (área libre de defectos) obtenida por la secuencia termográfica de 1000 imágenes.

Estas técnicas presentan a priori una gran ventaja con respecto a otras ya que permiten comprimir toda la información en una sola imagen (Skewgrama y Kurtograma), reduciendo significativamente el número de datos a interpretar.

- **Contraste absoluto de fase (PhAC)**

La técnica de procesamiento híbrida aplicando el contraste absoluto de fase (PhAC) combina tres técnicas de procesamiento diferentes: contraste absoluto diferencial (DAC), termografía pulsada de fase (PPT) y reconstrucción de señales termográficas (TSR). El cálculo del contraste absoluto de fase viene de la secuencia de fase obtenida a partir de la PPT; aplicando previamente un filtrado por TSR a dicha secuencia para reducir el ruido de la señal (en este caso se empleó un polinomio de grado 5)[255]. Debido a la simetría que presenta la secuencia de fase con respecto a la frecuencia $f=0$ Hz, la mitad de los datos son eliminados, permitiendo simplificar el procesamiento posterior, en el cual se aplica un contraste absoluto diferencial a la secuencia resultante utilizando como referencia el termograma anterior a la aparición del primer defecto.

La Fig. 4. 3 muestra las diferencias en la evolución de la respuesta térmica al aplicar estas técnicas a una secuencia sintética modelada con el software ThermoCalc ® con 6 defectos (aire) a la misma profundidad. Los resultados obtenidos con el PhAC permiten aumentar el nivel de contraste entre un área defectuosa y una sin defectos (soundarea), lo cual permite una mejor identificación y análisis de los defectos existentes en la muestra (ver Fig. 4. 4) respecto a otros métodos de procesamiento.

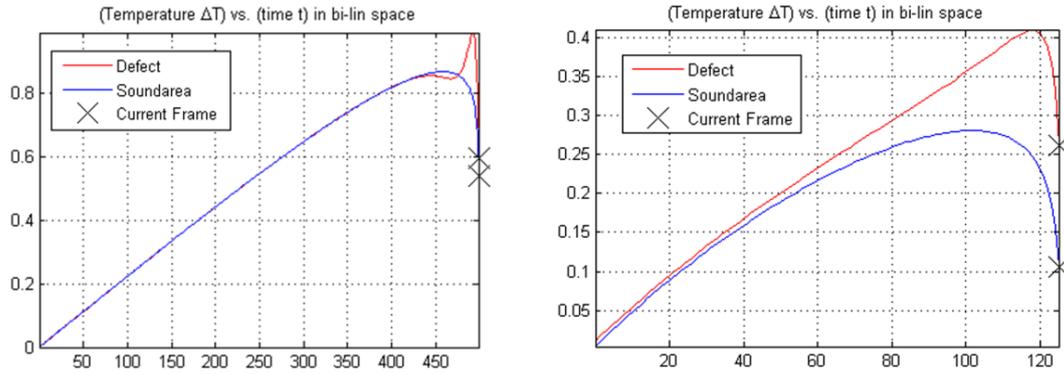


Fig. 4. 3. Evolución de la respuesta térmica del cálculo de la fase (a) y el del contraste absoluto de fase (b). Secuencia sintética.

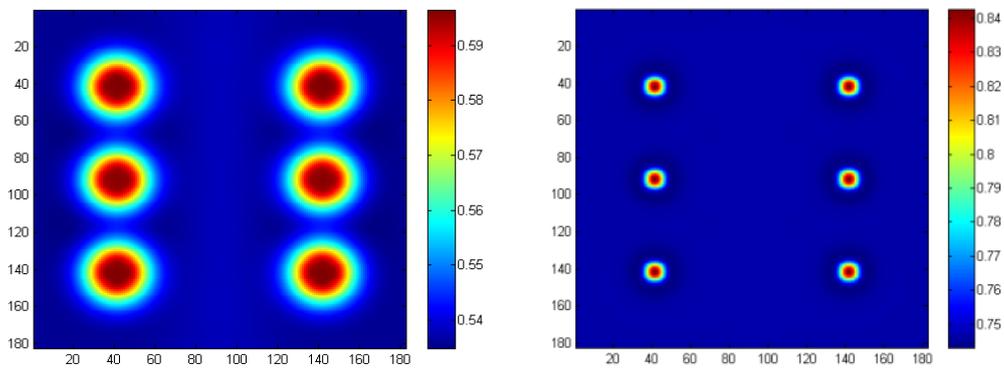


Fig. 4. 4. Termogramas resultantes del cálculo de la fase (a) y PhAC (b). Secuencia sintética.

Resultados similares se obtienen al aplicar dicha técnica en situaciones reales como es el caso de dos especímenes de fibra de carbono CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics), uno con geometría curva (CFRP007) y otro con geometría trapezoidal (CFRP008) (ver apartado 4.2.2) como se muestra en las figuras 4.5 - 4.8

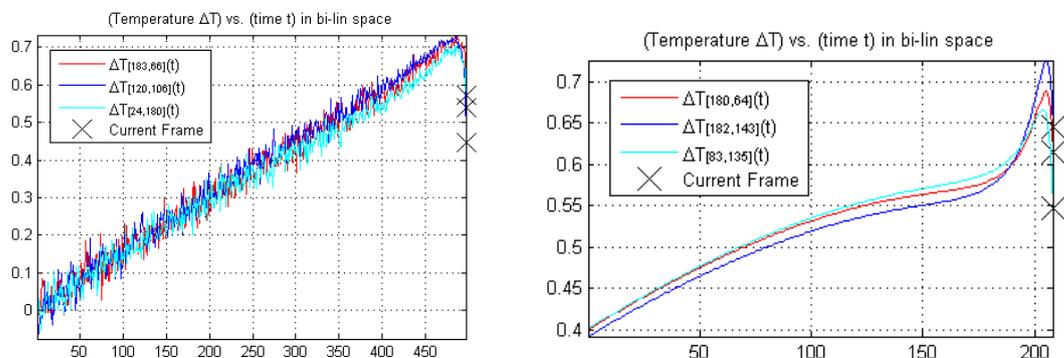


Fig. 4. 5. Evolución de la respuesta térmica del cálculo de la fase (a) y el del contraste absoluto de fase (b). CFRP007.

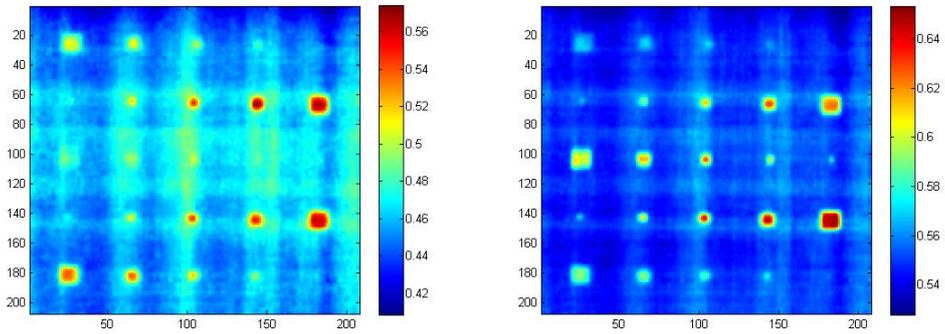


Fig. 4. 6. Termogramas resultantes del cálculo de la fase (a) y PhAC (b). CFRP007.

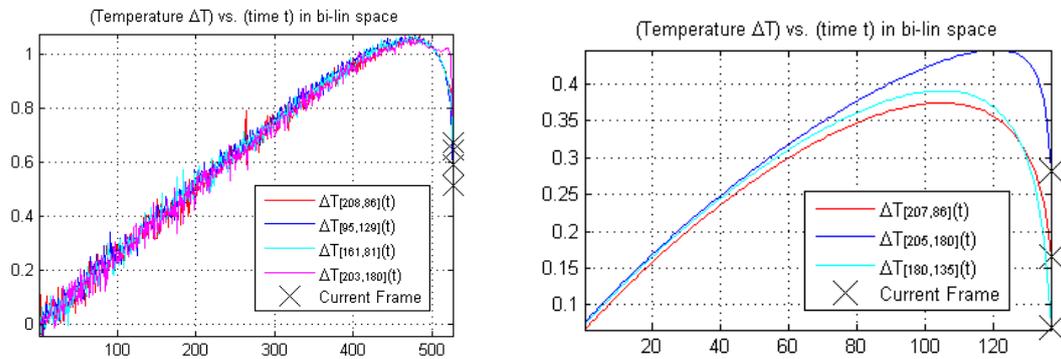


Fig. 4. 7. Evolución de la respuesta térmica del cálculo de la fase (a) y el del contraste absoluto de fase (b). CFRP008.

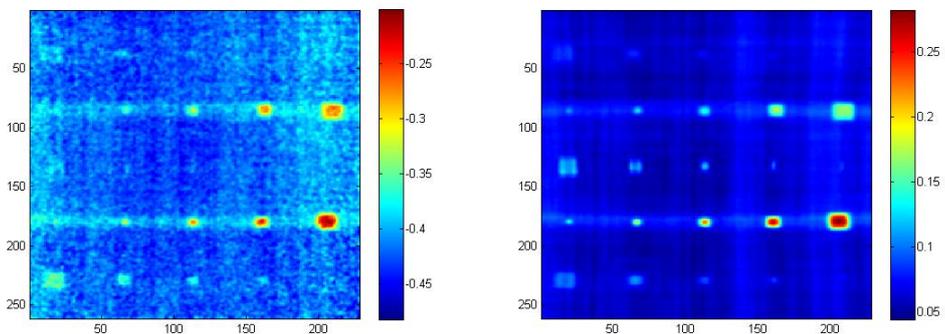


Fig. 4. 8. Termogramas resultantes del cálculo de la fase (a) y PhAC (b). CFRP008.

4.2. Estudio de bondad de los procesados

Para estudiar la bondad de los procesados se utilizará un cálculo de la relación señal-ruido, defecto/no defecto, que se aplica en el apartado 4.2.1 sobre las muestras seleccionadas, cuyas características se describen en el apartado 4.2.2. Se estudiará la bondad de estos nuevos procesados con respecto a otros clásicos en 4 aspectos: Material (apartado 4.2.3), Geometría de las muestras (apartado 4.2.4), Excitación y Ventana de termogramas (apartado 4.2.5).

4.2.1. Relación señal - ruido

El análisis mediante el cálculo de la relación señal-ruido (SNR- Signal to Noise Ratio) aplicado a cada uno de los resultados obtenidos a partir de las técnicas de procesamiento mencionadas anteriormente nos permite determinar qué algoritmo es más apropiado, dependiendo de la aplicación. La SNR describe el contraste entre un área defectuosa y su vecindad, estableciendo un rango dinámico medido en decibelios (dB). Para ello, se han seleccionado dos áreas para cada defecto: un área en el defecto que será considerada como "señal" (Sarea) y un área alrededor del defecto se define como "ruido" (Narea) (ver Fig. 4. 9). El cálculo del valor de la SNR proviene de:

$$SNR = \frac{S}{N} = 20 \log_{10} \left(\frac{\text{abs}(S_{\text{area}_{\text{promedio}}} - N_{\text{area}_{\text{promedio}}})}{\sigma} \right) [\text{dB}] \quad (4. 10)$$

donde σ es la desviación estándar del ruido y $S_{\text{area}_{\text{mean}}}$ y $N_{\text{area}_{\text{mean}}}$ son los valores medios de cada área, respectivamente [255].

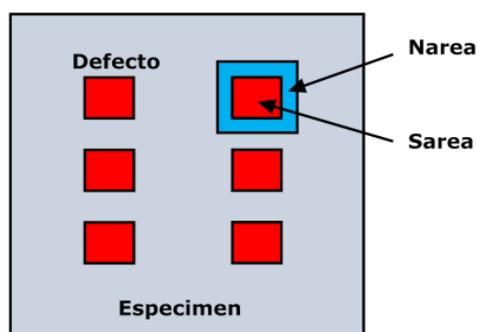


Fig. 4. 9. Selección de las áreas para el cálculo de la SNR.

El método de cuantificación de la bondad, basado en el análisis de relación señal-ruido aplicado a las técnicas de procesamiento de imágenes mencionadas en las secciones anteriores, es independiente de cómo aparece el defecto en el material. El defecto puede aparecer más frío o más caliente que su vecindad, pero esto no afecta al resultado debido al cálculo del valor absoluto.

4.2.2. Muestras empleadas en el estudio

Los materiales compuestos pueden definirse como aquellos materiales que consisten de 2 o más capas de componentes diferentes tanto química como físicamente separados por una interfaz distinta. Los diferentes materiales empleados se combinan con el fin de obtener un sistema cuyas propiedades estructurales y funcionales sean mejores que las de los componentes por separado [256]. El uso de los materiales compuestos ha aumentado exponencialmente en las últimas décadas y esto se debe a las múltiples ventajas que ofrece: baja densidad, resistencia a la corrosión, alta resistencia a la fatiga, etc. [256-258].

Con el objetivo de comprobar la bondad y robustez de los métodos de procesado propuestos se aplicarán a las medidas realizadas para 3 materiales diferentes: material compuesto por fibras de Kevlar[®] [259-264], especímenes de fibra de carbono CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) y espécimen de plexiglás (PLEXI). Además se emplearán diferentes geometrías en el caso de los especímenes de fibra de carbono (geometría plana, curva y trapezoidal). A continuación se describen las características y configuraciones de los diferentes especímenes empleados.

En la Fig. 4. 10 se muestran los 4 especímenes de Kevlar seleccionados para este estudio, cuyas características se describen en la Tabla 4. 1.

Muestra	Capas	Defectos
1	5	2 defectos de teflón
2	7	3 defectos de teflón
3	5	2 defectos de aire
4	7	3 defectos de aire

Tabla 4. 1. Composición de las muestras de Kevlar.

En las Fig. 4. 11 y Fig. 4. 12 se encuentran representados los diagramas de composición de las muestras Kevlar[®]/Epoxi empleadas en el estudio con defectos incorporados de teflón y aire respectivamente. La muestra Kevlar 1 está compuesta por 5 capas con dos defectos de teflón incorporados (D₁ y D₂). El defecto D₁ se encuentra localizado entre la capa 2 (Epoxi) y la capa 3 (Kevlar[®]), y el defecto D₂ entre la capa 3 y la capa 4 (Epoxi).

La muestra Kevlar 2 está compuesta por 7 capas con tres defectos de teflón incorporados (D₁, D₂ y D₃). El defecto D₁ se encuentra localizado entre la capa 2 (Epoxi) y la capa 3 (Kevlar[®]), el defecto D₂ entre la capa 3 y la capa 4 (Epoxi), y el defecto D₃ entre la capa 5 (Kevlar[®]) y la capa 6 (Epoxi).

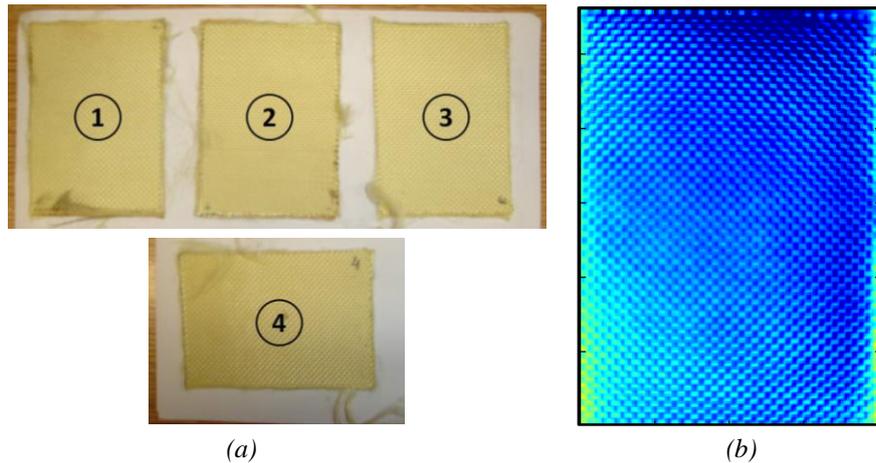


Fig. 4. 10. Muestras Kevlar con defectos incorporados (a). Muestra de 5 capas con 2 defectos de teflón (1), muestra de 7 capas con 3 defectos de teflón (2), muestra de 5 capas con 2 defectos de aire (3), y muestra de 7 capas con 3 defectos de aire (4). Termograma ejemplo de las muestras Kevlar (b).

La muestra Kevlar 3 está compuesta por 5 capas con dos defectos de aire (D_1 y D_2). El defecto D_1 se encuentra localizado entre las capas 2 y 3, y el defecto D_2 entre las capas 3 y 4. La muestra Kevlar 4 está compuesta por 7 capas con tres defectos de aire (D_1 , D_2 y D_3). El defecto D_1 se encuentra localizado entre las capas 2 y 3, el defecto D_2 entre las capas 3 y 4, y el defecto D_3 entre las capas 5 y 6. La muestra Kevlar 5 está compuesta por 7 capas con dos defectos de aire (D_1 y D_2) (verticales). El defecto D_1 se encuentra localizado entre las capas 2 y 3, y el defecto D_2 entre las capas 4 y 5.

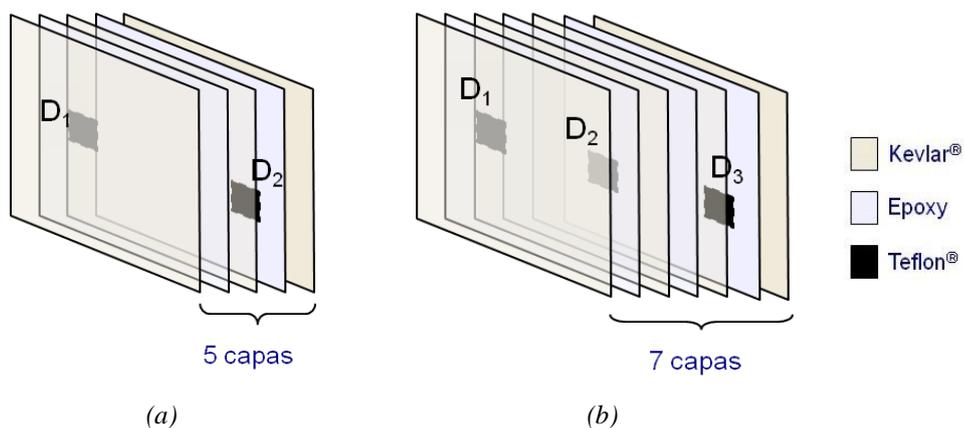


Fig. 4. 11. Muestras Kevlar con defectos de Teflón. Distribución de los defectos en muestras 1 (a) y 2 (b).

A continuación se muestran las características y configuraciones de las muestras de fibra de carbono plexiglás. La Fig. 4. 13 muestra la geometría de las muestras planas y la Fig. 4. 14 muestra la geometría del espécimen curvo (a) y la del trapezoidal (b) así como la distribución de los defectos en cada uno de ellos.

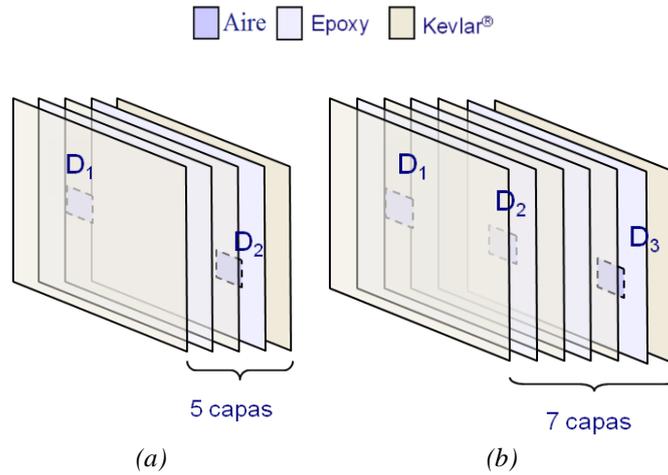


Fig. 4.12. Muestras Kevlar con defectos de aire. Distribución de los defectos en muestras 3 (a) y 4 (b).

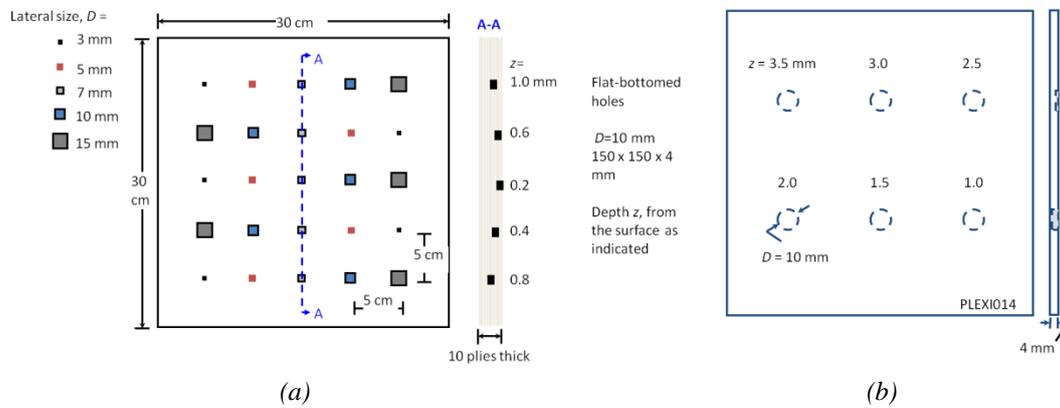


Fig. 4.13. Representación esquemática y localización de los defectos para los especímenes planos CFRP006(a) y PLEXI014 (b).

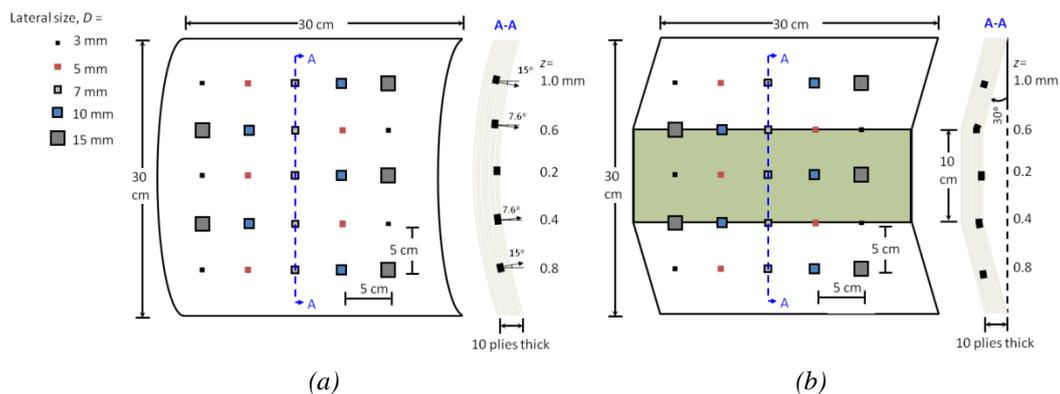


Fig. 4.14. Representación esquemática y localización de los defectos para los especímenes CFRP007(a) y CFRP008 (b).

El proceso de transferencia de calor en las muestras de Kevlar fue capturado por una cámara de infrarrojos (3 - 5 μ m) con una frecuencia de 50 Hz. Se ensayaron en reflexión mediante termografía pulsada utilizando dos flashes de alta potencia (6 kJ). La secuencia consta de 1800 imágenes para el proceso de enfriamiento. Los especímenes de CFRP y

plexiglás fueron ensayados en reflexión mediante termografía pulsada utilizando dos flashes de alta potencia (6,4 kJ durante 5 ms) [154]. El proceso de transferencia de calor en el material fue capturado por una cámara de infrarrojos (3 - 5 μm) con una frecuencia de muestreo de 157 Hz. El número de imágenes de las secuencias se truncó de 1896 (secuencia completa que incluye los procesos de calentamiento y enfriamiento) a 1800 imágenes para hacer uso solo del proceso de enfriamiento. Para las secuencias de imágenes con más de un termograma, se seleccionó el termograma con el mayor número de defectos detectados y que proporcionara toda la información posible acerca de la composición de la placa. Para analizar la bondad y robustez de las nuevas técnicas propuestas (Skewness, Kurtosis y PhAC) se empleará la medida de relación señal-ruido (SNR). Además de las técnicas propuestas, se incluirán en el análisis otras conocidas como es el caso de PCT y PPT.

4.2.3. Resultados para diferentes materiales

A continuación se muestran los resultados obtenidos para los 3 tipos de materiales empleados: Kevlar (4 especímenes), CFRP (CFRP006) y Plexiglás (PLEXI014) de igual geometría (plana).

En las Fig. 4. 15 y Fig. 4. 16 se muestran los termogramas seleccionados para la muestra **Kevlar 1**, donde se han podido identificar en mayor medida los defectos y discontinuidades presentes en la misma: el termograma obtenido en 0,14 Hz en la secuencia de amplitud y en 0,19 Hz en la secuencia de fase al aplicar PPT, el EOF3 a partir de PCT, a la frecuencia de $f = 44,83$ Hz al aplicar PhAC y los obtenidos por los momentos estadísticos 3^{er} orden (skewness) y 4^{to} orden (Kurtosis).

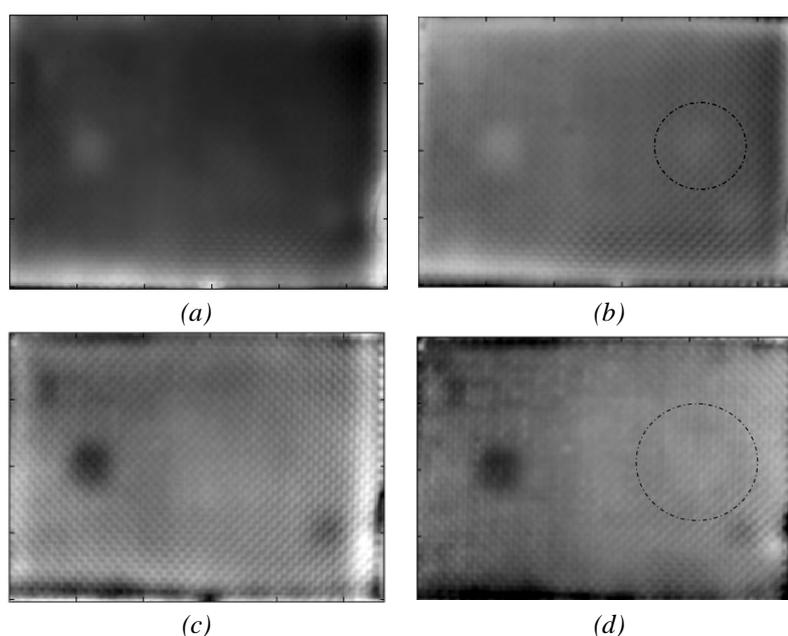


Fig. 4. 15. Muestra Kevlar 1. Amplitud (a), Fase (b), PCT(c), PhAC (d).

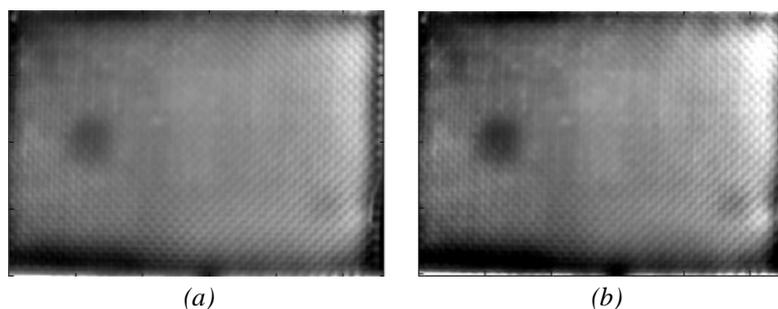


Fig. 4. 16. Muestra Kevlar 1. Skewness (a), Kurtosis (b).

En todos los termogramas seleccionados se ha podido identificar el defecto D1 (menos profundo) pero el defecto D2 solo se detecta a bajas frecuencias (Fig. 4. 15b) y al aplicar PhAC (Fig. 4. 15d). A partir de los resultados obtenidos se ha podido identificar la presencia de defectos no deseados. Estos defectos pueden deberse a excesos de adhesivo, presencia de aire, etc. y producirse durante el propio proceso de fabricación (ver Fig. 4. 17).

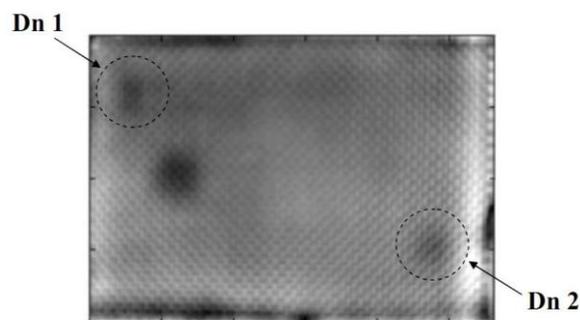


Fig. 4. 17. Muestra Kevlar 1. Defectos no deseados detectados (Dn 1 y Dn 2).

En la Fig. 4. 18 y Fig. 4. 19 se muestran los termogramas seleccionados para la muestra **Kevlar 2**, donde se han podido identificar en mayor medida los defectos y discontinuidades presentes en la misma: el termograma obtenido en 0,19 Hz en la secuencia de amplitud y en 0,24 Hz en la secuencia de fase al aplicar PPT, el EOF3 a partir de PCT, a la frecuencia de $f = 44,68$ Hz al aplicar PhAC y los obtenidos por los momentos estadísticos 3^{er} orden (skewness), 4^{to} orden (Kurtosis).

En todos los termogramas seleccionados se ha podido identificar el defecto D1 (menos profundo), el defecto D2 solo es identificado en la EOF3 a partir de PCT (Fig. 4. 18c) y el defecto D3 no se ha podido identificar. En esta muestra no se han detectado defectos no deseados.

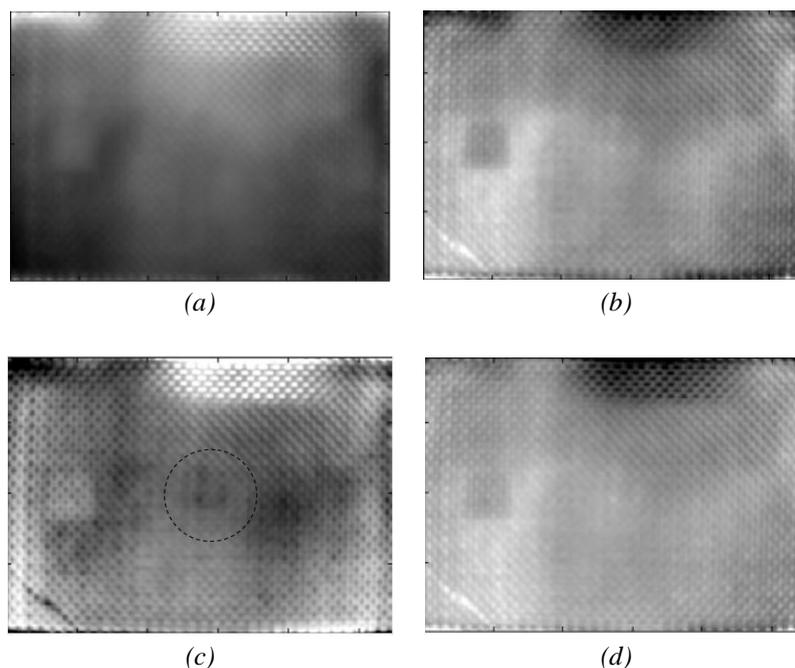


Fig. 4. 18. Muestra Kevlar 2. Amplitud (a), Fase (b), PCT(c), PhAC (d).

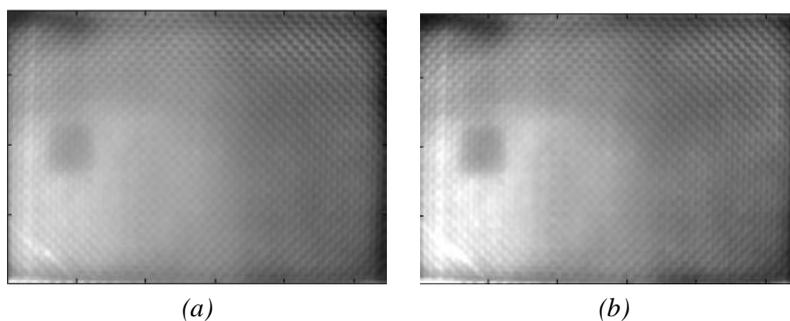


Fig. 4. 19. Muestra kevlar 2. Skewness (a), Kurtosis (b).

En la Fig. 4. 20 y Fig. 4. 21 se muestran los termogramas seleccionados para la muestra **Kevlar 3**, donde se han podido identificar en mayor medida los defectos y discontinuidades presentes en la misma: el termograma obtenido en 0,1 Hz en la secuencia de amplitud y en 0,19 Hz en la secuencia de fase al aplicar PPT, el EOF3 a partir de PCT, a la frecuencia de $f = 44,63$ Hz al aplicar PhAC y los obtenidos por los momentos estadísticos 3^{er} orden (skewness) y 4^{to} orden (Kurtosis).

En todos los termogramas seleccionados se ha podido identificar el defecto D1 (menos profundo), el defecto D2 aunque en menor medida también ha sido posible su identificación.

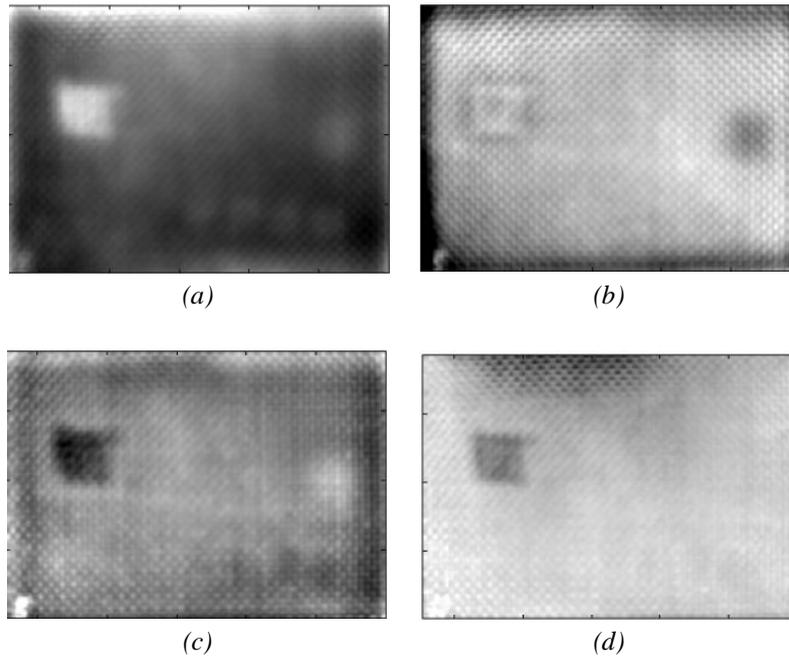


Fig. 4. 20. Muestra Kevlar 3. Amplitud (a), Fase (b), PCT(c), PhAC (d).

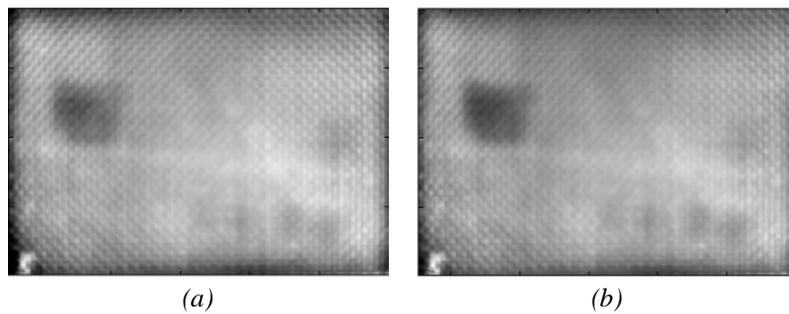


Fig. 4. 21. Muestra Kevlar 3. Skewness(a), Kurtosis (b).

A partir de los resultados obtenidos se ha podido identificar la presencia de defectos no deseados. Estos defectos pueden deberse a excesos de adhesivo, presencia de aire, etc. y producirse durante el propio proceso de fabricación (ver Fig. 4. 22).

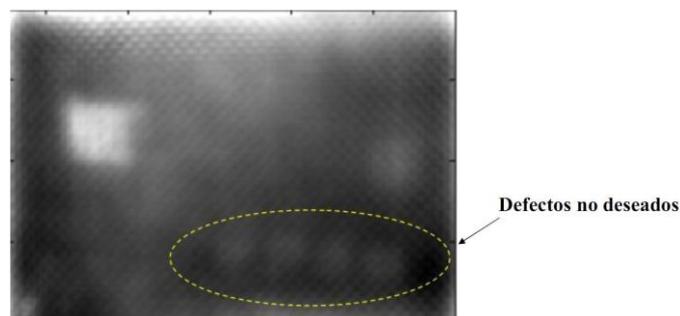


Fig. 4. 22. Muestra Kevlar 3. Defectos no deseados detectados.

En la Fig. 4. 23 y Fig. 4. 24 se muestran los termogramas seleccionados para la muestra **Kevlar 4**, donde se han podido identificar en mayor medida los defectos y discontinuidades presentes en la misma: el termograma obtenido en 0,24 Hz en la secuencia de amplitud y en 0,14 Hz en la secuencia de fase al aplicar PPT, el EOF3 a partir de PCT, a la frecuencia de $f = 44,73$ Hz al aplicar PhAC y los obtenidos por los momentos estadísticos de 3^{er} orden (skewness), 4^{to} orden (Kurtosis).

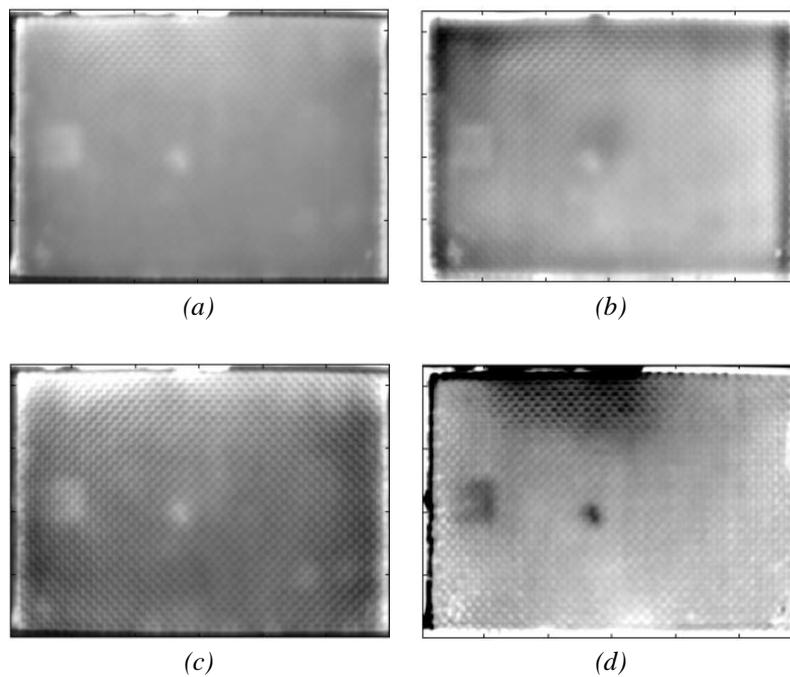


Fig. 4. 23. Muestra Kevlar 4. Amplitud (a), Fase (b), PCT(c), PhAC (d).

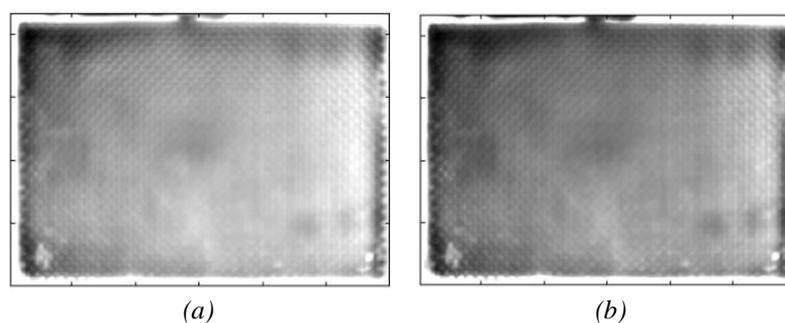


Fig. 4. 24. Muestra Kevlar 4. Skewness (a), Kurtosis (b)

En todos los termogramas seleccionados se ha podido identificar el defecto D1 (menos profundo), el defecto D2 se detecta con mayor dificultad debido a la presencia de un defecto no deseado en la misma posición pero a menor profundidad. El defecto D3 es prácticamente indetectable.

Los termogramas seleccionados para el espécimen CFRP006 fueron: los obtenidos por kurtosis y Skewness (Fig. 4. 26), el EOF3 a partir de PCT, el termograma obtenido a la frecuencia de $f = 53$ Hz al aplicar PhAC (Fig. 4. 25), en 0,1 Hz en la secuencia de amplitud y en 0,3 Hz en la secuencia de fase (Fig. 4. 27).

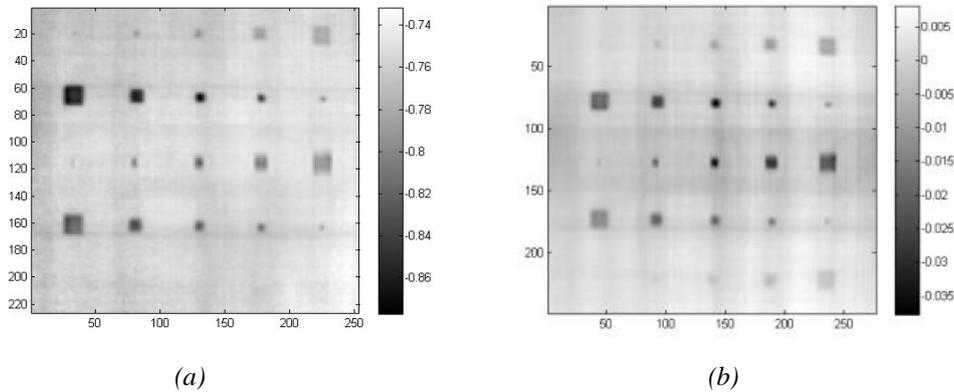


Fig. 4. 25. Resultados para el espécimen CFRP006 al aplicar PhAC (a) y PCT (b).

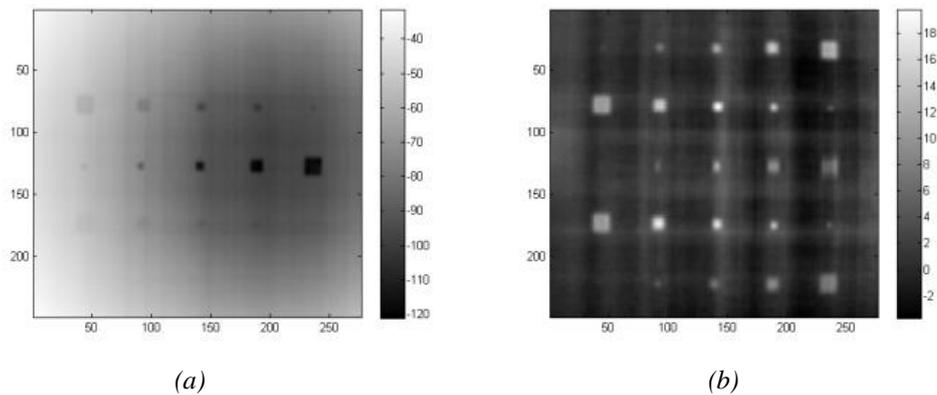


Fig. 4. 26. Resultados para el espécimen CFRP006 al aplicar Skewness (a) y Kurtosis (b).

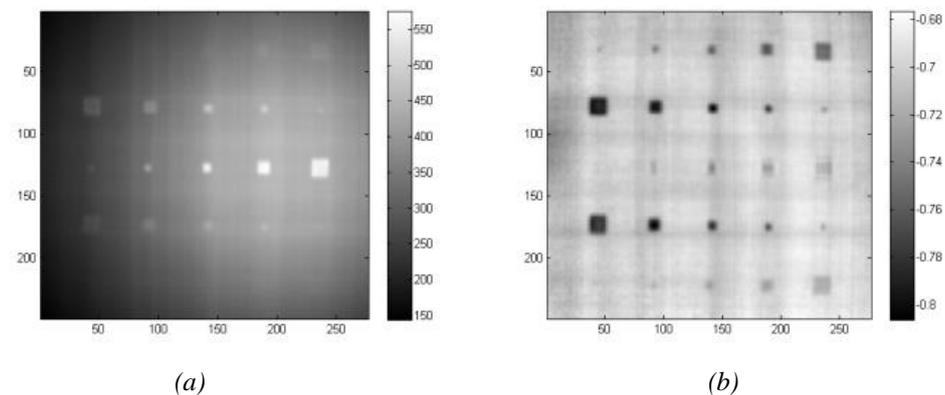


Fig. 4. 27. Resultados para el espécimen CFRP006 al aplicar Amplitud (PPT) (a) y Fase (PPT) (b).

En los termogramas seleccionados se han podido identificar, casi en su totalidad, los defectos presentes en el material. Los defectos más difíciles de identificar son los de menor tamaño, independientemente de su profundidad.

Los termogramas seleccionados para el espécimen PLEXI014 fueron: los obtenidos por kurtosis y Skewness (Fig. 4. 29), el EOF3 a partir de PCT (Fig. 4. 28b), el termograma obtenido a la frecuencia de $f = 43$ Hz al aplicar PhAC (Fig. 4. 28a), en 0,1 Hz en la secuencia de amplitud y en 0,1 Hz en la secuencia de fase (Fig. 4. 30).

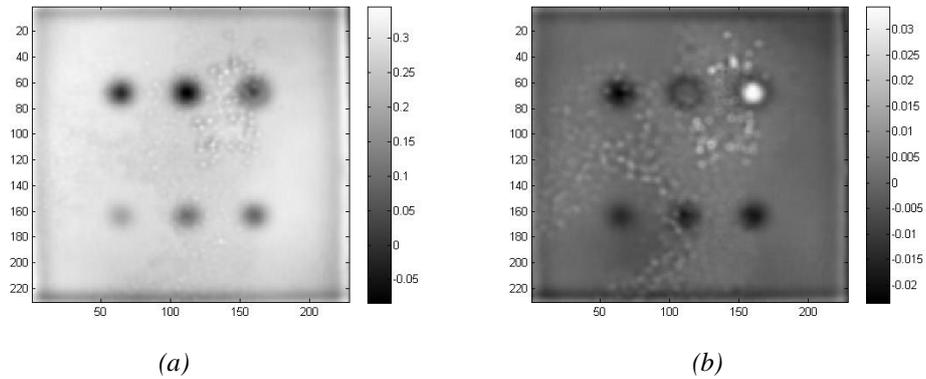


Fig. 4. 28. Resultados para el espécimen PLEXI014 al aplicar PhAC (a) y PCT (b).

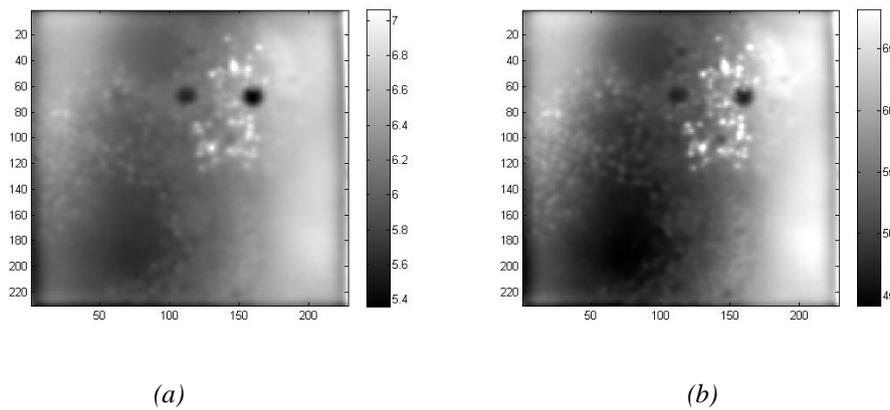


Fig. 4. 29. Resultados para el espécimen PLEXI014 al aplicar Skewness (a) y Kurtosis (b).

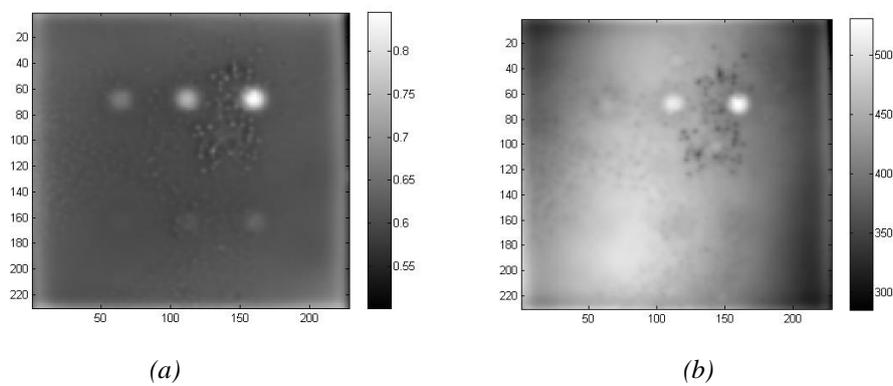


Fig. 4. 30. Resultados para el espécimen PLEXI014 al aplicar Amplitud (PPT) (a) y Fase (PPT) (b).

A partir de los resultados obtenidos para la muestra de plexiglás (PLEXI014) se ha podido identificar la presencia de defectos no deseados debidos al deterioro en la capa de pintura de la muestra producto del uso intensivo en el tiempo.

La Fig. 4. 31 muestra las áreas seleccionadas para el cálculo de cuantificación de bondad mediante el empleo de la relación señal a ruido en las muestras de Kevlar. Se emplearon dos configuraciones tipo, una para las muestras Kevlar con dos defectos (Fig. 4. 31c) y otra para las muestras Kevlar con tres defectos (Fig. 4. 31b), siguiendo la distribución xy para los defectos y XY para el ruido (ver Fig. 4. 31c). Las dimensiones de las áreas dependen en cada caso de las dimensiones de los defectos según la muestra.

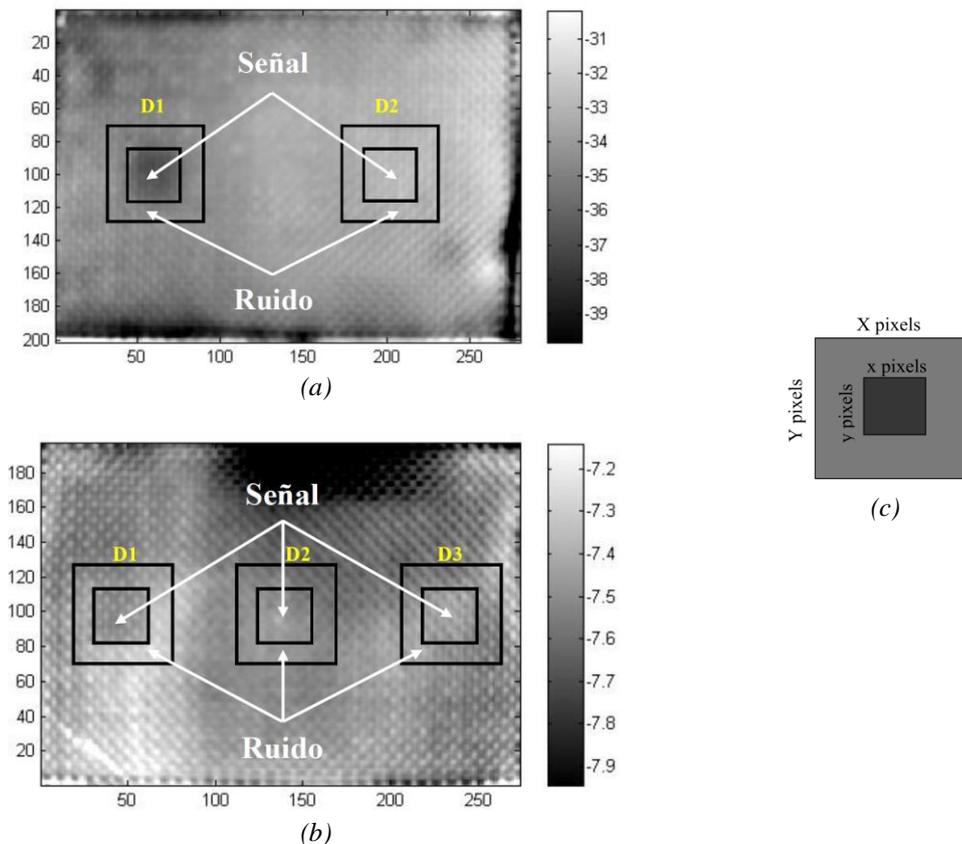


Fig. 4. 31. Representación de las áreas seleccionadas para el análisis de cuantificación de bondad en las muestras de Kevlar con dos defectos (a), tres defectos (b) y la configuración empleada (c).

La Fig. 4. 32 muestra las áreas seleccionadas para las muestras CFRP006 y PLEXI014 donde se emplearon configuraciones xy para los defectos y configuraciones XY (Fig. 4. 32c) para el ruido; Las dimensiones de las áreas dependen de las dimensiones de los defectos en cada caso. Los defectos han sido enumerados de izquierda a derecha (Fig. 4. 32). Para la secuencia de imágenes obtenidas con el espécimen CFRP006 de fibra de carbón, se empleó un área de 15x16 píxeles para los defectos y una de 19x40 píxeles para el ruido. En el caso del espécimen PLEXI014 de plexiglás se empleó un área cuadrada de 27x27 píxeles para los defectos y otra de 47x47 píxeles para el ruido.

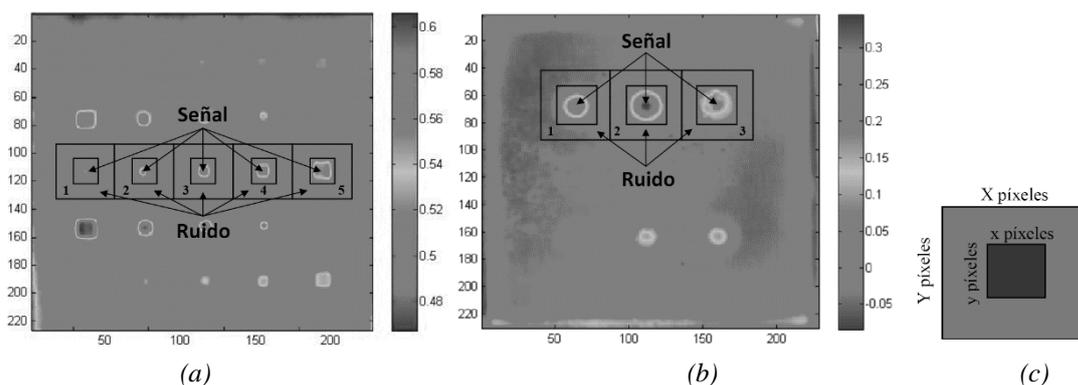


Fig. 4.32. Representación de las áreas seleccionadas para el análisis de cuantificación de los especímenes CFRP (a) y PLEXI014 (b) y su configuración (c).

En la tabla 4.2 se muestran los valores de SNR resultantes al aplicar los procesados y para cada uno de los defectos seleccionados en cada espécimen. Como se puede observar, los valores de SNR nos permiten cuantificar la identificación de los defectos al aplicar las técnicas de procesado en cada una de las muestras seleccionadas para tres materiales diferentes (Kevlar, CFRP y Plexiglás).

La identificación de los defectos está condicionada por la configuración de los mismos, ya que los defectos con menor profundidad respecto a la superficie del material podrán ser identificados con mayor facilidad. La composición de los defectos es otro factor importante a tener en cuenta, ya que las características del material influyen directamente en la profundidad máxima detectable.

En el caso de las muestras de Kevlar analizadas, los defectos presentan la misma geometría pero profundidades diferentes. Los valores del parámetro SNR estarán condicionados por la profundidad a la que se encuentre el defecto y variarán de ND (en el caso de los defectos no identificados) y $SNR < 0$ (en el caso de los defectos más profundos y de difícil de detección) a $SNR > 0$ (para los defectos con menor profundidad y por lo tanto mejor identificados).

En el caso del espécimen CFRP006 donde los defectos analizados se encuentran a la misma profundidad pero presentan dimensiones diferentes, los valores del parámetro SNR estarán condicionados por la dimensión. Por lo cual, los defectos con menor profundidad respecto a la superficie del material así como los de mayor tamaño, podrán ser identificados con mayor facilidad.

En el caso del espécimen PLEXI014 donde los defectos presentan la misma geometría, los valores del parámetro SNR estarán condicionados por la profundidad de los defectos, donde, los más profundos tendrán una peor relación señal – ruido ($SNR < 0$) y en algunos casos dependiendo de la técnica de procesado aplicada no serán detectados (ND) y en los menos profundos se obtendrán mejores resultados ($SNR > 0$).

Defecto	Skewness	Kurtosis	PCT	PhAC	PPT (A)	PPT (F)
	SNR(dB)	SNR(dB)	SNR(dB)	SNR(dB)	SNR(dB)	SNR(dB)
KEVLAR 1						
1	2,4792	2,7456	3,6787	3,2251	-1,4584	-1,3957
2	ND	ND	ND	-13,797	ND	-21,580
KEVLAR 2						
1	2,7914	3,1555	1,6464	2,6823	-2,4299	3,8240
2	ND	ND	-0,5619	-8,9184	ND	ND
3	ND	ND	ND	ND	ND	ND
KEVLAR 3						
1	4,7910	6,3651	6,4478	6,8188	8,1010	-1,4140
2	-18,874	-18,788	-9,0386	ND	-15,459	2,0351
KEVLAR 4						
1	-12,324	-17,616	1,2478	0,5371	1,8573	-1,5014
2	-20,852	-20,403	-18,531	-4,9330	-16,036	1,6945
3	ND	ND	-34,700	ND	-35,845	ND
CFRP006						
1	ND	-27,957	-28,462	-5,2655	-30,902	ND
2	-0,1589	-5,2688	8,4542	7,1626	-4,6162	-1,1796
3	4,0325	3,6098	12,560	10,936	4,0451	3,5273
4	7,4824	15,638	17,748	14,780	15,391	6,0931
5	9,1168	17,339	16,881	18,754	17,639	6,6220
PLEXI014						
1	ND	-14,845	-4,9244	7,1290	-8,2767	19,345
2	-6,897	-1,74	5,7135	12,983	-2,3434	20,232
3	-1,0002	4,0645	12,025	14,358	4,783	19,251

Tabla 4. 2. Valores de SNR obtenidos. Los defectos identificados se han sombreado (SNR>0).

4.2.4. Resultados para diferentes geometrías

A continuación se muestran los resultados obtenidos para muestras de fibra de carbono CFRP empleando dos geometrías diferentes comparadas con geometría plana (CFRP006): geometría curva (CFRP007) y geometría trapezoidal (CFRP008).

Los termogramas seleccionados para el espécimen CFRP007 fueron: los obtenidos por kurtosis y Skewness (Fig. 4. 34), el EOF3 a partir de PCT (Fig. 4. 33b), el termograma obtenido a la frecuencia de $f = 63$ Hz al aplicar PhAC (Fig. 4. 33a), en 0,1 Hz en la secuencia de amplitud y en 0,1 Hz en la secuencia de fase (Fig. 4. 35).

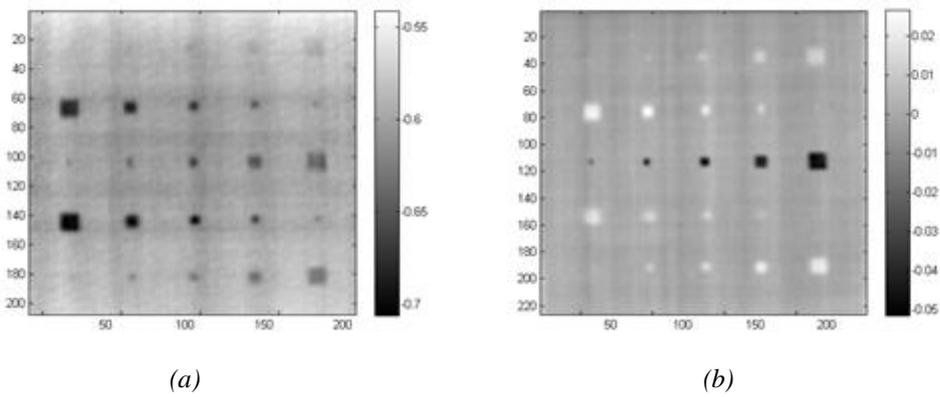


Fig. 4. 33. Resultados para el espécimen CFRP007 al aplicar PhAC (a) y PCT (b).

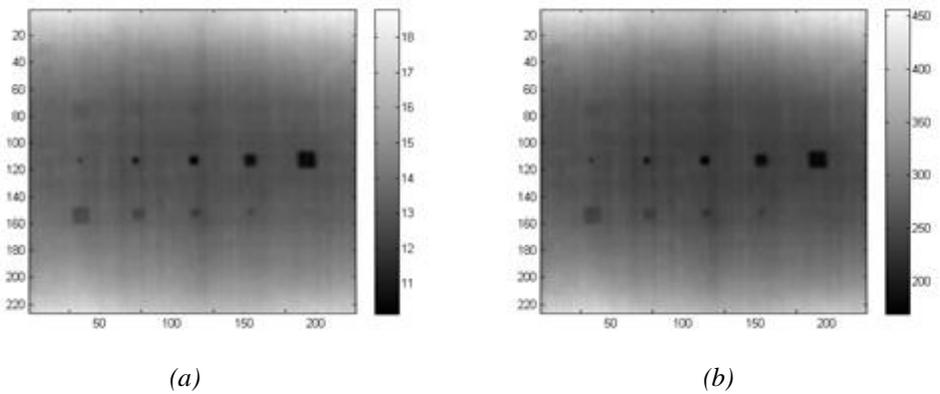


Fig. 4. 34. Resultados para el espécimen CFRP007 al aplicar Skewness (a) y Kurtosis (b).

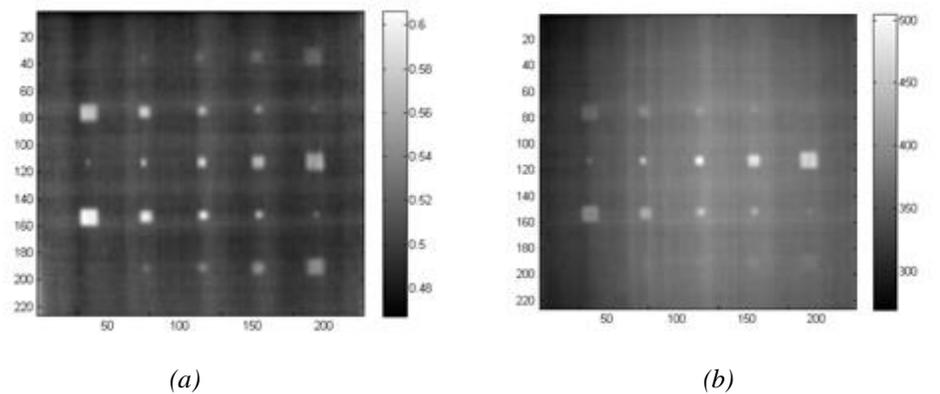


Fig. 4. 35. Resultados para el espécimen CFRP007 al aplicar Amplitud (PPT) (a) y Fase (PPT) (b).

En el caso del espécimen CFRP008 los termogramas seleccionados fueron: PCT (EOF2) (Fig. 4. 36b), PPT en amplitud (en $f=0.1$ Hz) y fase (en $f=0.1$ Hz) (Fig. 4. 38) y los obtenidos por kurtosis y Skewness, PhAC ($f = 42$ Hz) (Fig. 4. 37).

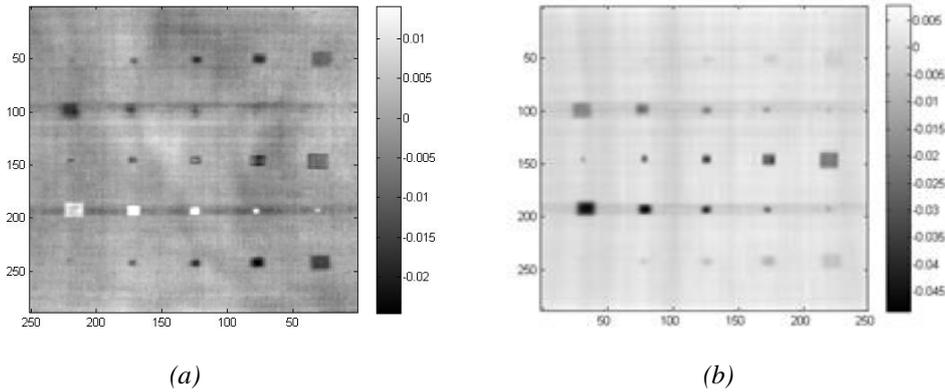


Fig. 4. 36. Resultados para el espécimen CFRP008 al aplicar PhAC (a) y PCT (b).

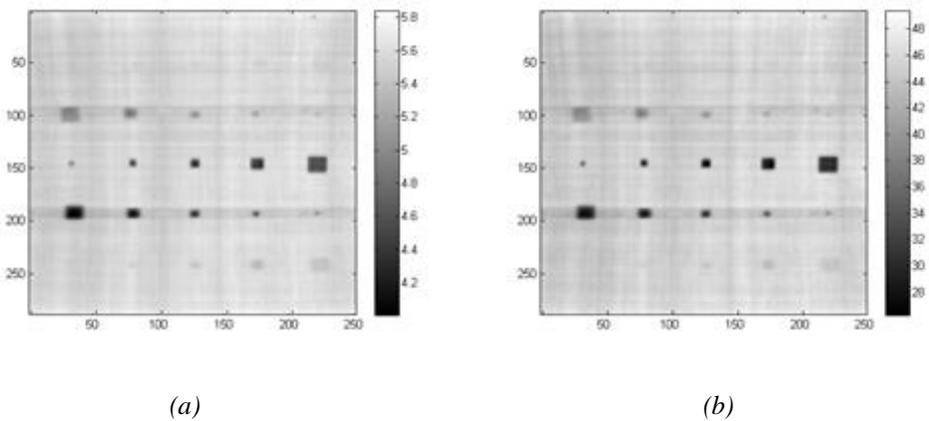


Fig. 4. 37. Resultados para el espécimen CFRP008 al aplicar Skewness (a) y Kurtosis (b).

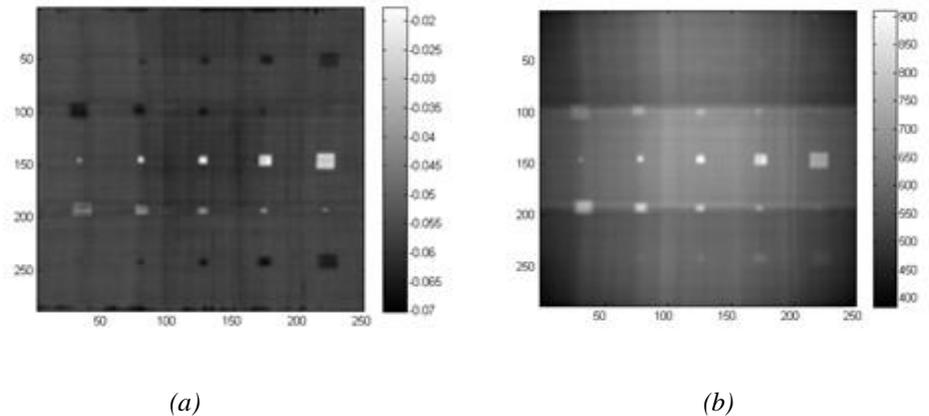


Fig. 4. 38. Resultados para el espécimen CFRP008 al aplicar Amplitud (PPT) (a) y Fase (PPT) (b).

Independientemente de la geometría de la muestra, los resultados variarán en función de la técnica de procesamiento empleada. En el caso del espécimen de geometría curva, se han podido identificar prácticamente todos los defectos presentes en el material, mientras que en el espécimen de geometría trapezoidal, los defectos situados en las zonas inclinadas se detectan con mayor dificultad.

La Fig. 4. 32 muestra las áreas seleccionadas para el cálculo de cuantificación utilizando relación señal a ruido. En ambos tipos de muestras (CFRP007 y CFRP008), se emplearon configuraciones xy para los defectos y configuraciones XY (Fig. 4. 32c) para el ruido. Para las secuencias de imágenes obtenidas estos especímenes de fibra de carbón, se empleó un área de 15x16 píxeles para los defectos y una de 19x40 píxeles para el ruido.

En la Tabla 4. 3 se muestran los valores de SNR resultantes al aplicar los procesados y para cada uno de los defectos seleccionados en cada espécimen, así como los obtenidos para el espécimen plano CFRP006. Como se puede observar, los valores de SNR nos permiten cuantificar la identificación de los defectos al aplicar las técnicas de procesado en los especímenes de geometría diferente. La identificación de los defectos estará también condicionada por la configuración de los mismos, ya que los defectos con menor profundidad respecto a la superficie del material así como los de mayor tamaño, podrán ser identificados con mayor facilidad.

Defecto	Skewness	Kurtosis	PCT	PhAC	PPT (A)	PPT (F)
	SNR(dB)	SNR(dB)	SNR(dB)	SNR(dB)	SNR(dB)	SNR(dB)
CFRP007						
1	-5,48411	-5,3206	-4,9247	-1,4090	-18,3772	ND
2	3,97411	4,9313	4,6748	5,2835	-1,02852	-4,65571
3	9,15906	10,166	7,8956	11,805	7,98469	-0,51944
4	14,1176	15,321	14,756	7,3762	14,3117	2,69779
5	20,8197	21,954	23,33	16,652	16,4575	5,43181
CFRP008						
1	-2,3043	-2,2912	-3,0386	-1,8538	-7,5137	ND
2	10,814	9,8998	6,5088	9,4621	0,1066	-24,628
3	16,399	16,271	15,722	16,728	15,467	-0,3343
4	23,794	23,971	23,818	22,914	13,198	8,8131
5	20,902	20,567	19,54	21,477	13,471	6,0709
CFRP006						
1	ND	-27,957	-28,462	-5,2655	-30,902	ND
2	-0,1589	-5,2688	8,4542	7,1626	-4,6162	-1,1796
3	4,0325	3,6098	12,560	10,936	4,0451	3,5273
4	7,4824	15,638	17,748	14,780	15,391	6,0931
5	9,1168	17,339	16,881	18,754	17,639	6,6220

Tabla 4. 3. Valores de SNR obtenidos. Los defectos identificados se han sombreado (SNR>0).

En los especímenes de fibra de carbono seleccionados, los defectos analizados se encuentran a la misma profundidad pero presentan dimensiones diferentes, los valores del parámetro SNR estarán condicionados por la dimensión y variarán de ND (en el caso de los defectos no identificados) y SNR<0 (en el caso de los defectos de menor dimensión) a SNR>0 (para los defectos de mayor dimensión y por lo tanto mejor identificados). A partir de los termogramas seleccionados se ha podido comprobar que la geometría de las muestras influye directamente en la detección de los defectos, por lo cual, los defectos localizados en las zonas no planas se identificarán con mayor dificultad

4.2.5. Resultados para distinta excitación y enventanado

Con el objetivo de comprobar la eficiencia de los métodos propuestos, en el siguiente paso se analizarán medidas realizadas con distinta excitación (variando el número de flashes), así como medidas variando el enventanado (número de termogramas) de la secuencia térmica medidas. Para este análisis se empleó el espécimen CFR006 y dos configuraciones de ensayo. En la primera configuración de ensayos (y como se ha descrito anteriormente), se emplearon dos flashes de alta potencia (6 kJ durante 5 ms). Para la segunda configuración de ensayos se mantuvieron las condiciones anteriores pero utilizando como fuente de excitación solo 1 de los 2 focos.

En la Fig. 4. 39 se muestran los valores obtenidos para los defectos localizados en la segunda fila a partir de los kurtogramas resultantes para un enventanado de 1800 imágenes. Como se puede apreciar, al emplear solo 1 foco, se consigue un calentamiento menos uniforme sobre la superficie de la muestra, limitando de esta forma, la correcta identificación de todos los defectos presentes en el material.

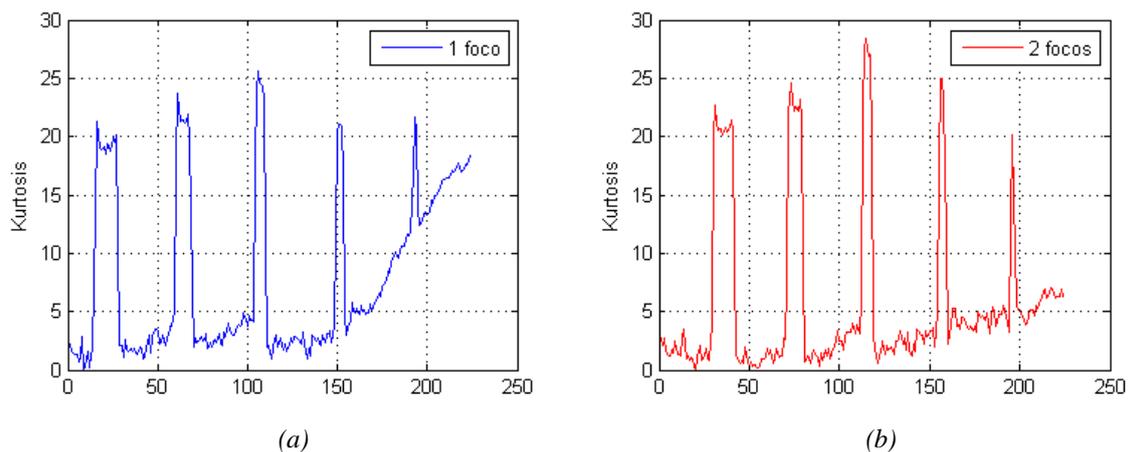


Fig. 4. 39. Distribución de los defectos empleando 1 foco (a) y 2 focos (b).

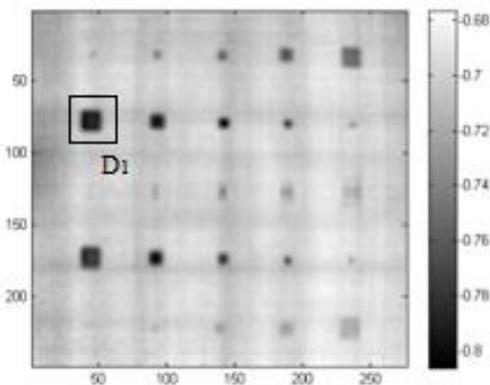


Fig. 4. 40. Defecto D1 empleado en el análisis comparativo.

Al comparar los valores del parámetro SNR (ver Tabla 4. 4), empleando como referencia el defecto D_1 (ver Fig. 4. 40) (primero de izquierda a derecha) localizado en la segunda fila para los ensayos realizados con las dos configuraciones (1 y 2 focos) se puede comprobar que el mismo defecto se identifica mejor haciendo uso de dos flashes ya que la relación señal-ruido está 4 dB por encima.

Igualmente en la Tabla 4. 4 se muestran los valores obtenidos para el defecto D_1 (ver Fig. 4. 40) en las dos configuraciones de ensayos variando el enventanado de la secuencia de 600 a 1800 imágenes. La relación señal-ruido prácticamente permanece inalterable al reducir el enventanado.

La reducción del enventanado de la secuencia de imágenes a emplear permite minimizar el tiempo de procesado pero podría limitar la correcta identificación de los defectos, ya que se dispone de menos información del proceso de enfriamiento del material y de la aparición de los defectos (ver Fig. 4. 41).

Técnica	Enventanado				
	600	900	1200	1500	1800
	SNR(dB)	SNR(dB)	SNR(dB)	SNR(dB)	SNR(dB)
Kurtosis					
D1 (1 Foco)	22,2644	22,2786	22,2802	22,3278	22,6836
D1 (2 Focos)	25,4850	25,6579	25,9763	26,5179	27,4207
Skewness					
D1 (1 Foco)	9,5461	9,6883	9,7097	10,0822	10,4481
D1 (2 Focos)	15,2161	16,4910	16,6533	17,5847	17,6627
PhAC					
D1 (1 Foco)	23,1754	23,2140	23,4815	23,6130	24,3912
D1 (2 Focos)	30,3578	30,8523	30,8744	31,1793	31,5769

Tabla 4. 4. Valores de SNR obtenidos, empleando diferentes enventanados y para ensayos con 1 y 2 focos (CFRP006).

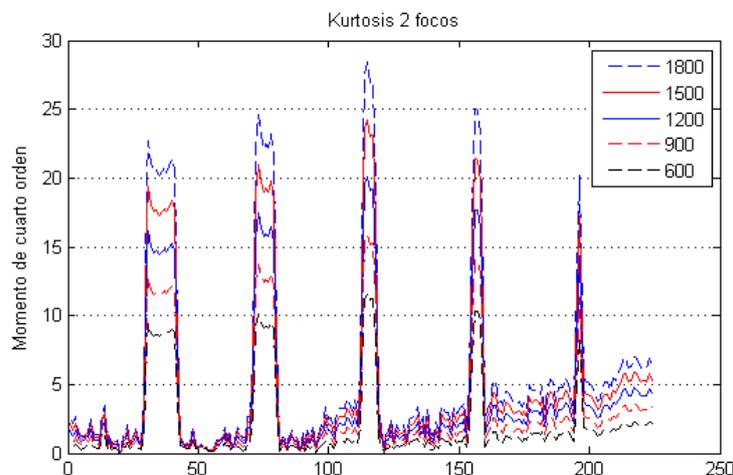


Fig. 4. 41. Distribución de los defectos empleando diferentes enventanados (600 a 1800 imágenes).

4.3. Conclusiones parciales

En este capítulo se han propuesto 3 técnicas nuevas de procesado de secuencias termográficas (Kurtosis, Skewness y PhAC). Con el objetivo de comprobar la bondad de las mismas han sido aplicadas en muestras de 3 tipos de materiales diferentes (Kevlar, CFRP y Plexiglás). Para comprobar su robustez se implementaron excitaciones no homogéneas y diferentes tiempos de captura de la secuencia.

En el caso del estudio para diferentes tipos de materiales se puede concluir que la identificación de los defectos o discontinuidades estarán condicionadas por los métodos de análisis empleados, por las características de los defectos, así como por la profundidad de los mismos. En los dos tipos de defectos analizados (teflón y aire) en las muestras de Kevlar se ha podido comprobar que los defectos de aire se detectan hasta profundidades de 4 capas mientras que los defectos de teflón son difícilmente detectables a partir de la 3^{ra} capa independientemente de las técnicas empleadas. La detección de defectos no deseados en algunos de los especímenes demuestra la validez de las técnicas empleadas en la identificación de discontinuidades y defectos en muestras Kevlar®/Epoxy que puedan producirse durante los procesos de fabricación permitiendo la incorporación de estos análisis en los procesos de inspección de calidad, ofreciendo alternativa rápida y sencilla a la técnicas empleadas en la industria para la evaluación de los mismos. En el caso del espécimen de plástico reforzado con fibra de carbono (CFRP006) y el espécimen de plexiglás (PLEXI014) los mejores resultados se obtienen mediante las nuevas técnicas propuestas y mediante PCT, aunque, valorando en cada caso el número de defectos detectados ($SNR > 0$) y la configuración de los mismos, los métodos de procesado que ofrecen mejores resultados son: el análisis por componentes principales (PCT) y el contraste absoluto de fase (PhAC), al igual que en el caso de las muestras de Kevlar.

En el caso del estudio para diferentes tipos de geometrías se puede concluir que independientemente de la característica y configuración de los defectos, la geometría de las muestras influye directamente en la detección de los defectos. Debido a las características propias de los ensayos en reflexión, a media que la superficie del material pierda perpendicularidad respecto a la cámara térmica, los defectos en esa zona se identificarán con mayor dificultad. A partir de los datos obtenidos en este estudio se puede comprobar que los métodos de procesado que ofrecen mejores resultados son: el análisis por componentes principales (PCT) y el propuesto en este trabajo (PhAC).

En el caso del estudio para diferentes excitaciones y inventanado se ha podido cuantificar la bondad y robustez de las técnicas de procesado propuestas. A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que los mejores resultados son los obtenidos al aplicar PCT y el propuesto PhAC, permitiendo una mayor detección de defectos y discontinuidades en las muestras analizadas, independientemente de la configuración y características de estos.

Publicaciones propias

Las contribuciones presentadas a lo largo de este capítulo han dado lugar a una publicación en revista internacional y otra en un congreso nacional:

- Quantification by signal to noise ratio of active infrared thermography data processing techniques. Optics and Photonics Journal (OPJ), 2013.
- Procesado de secuencias termográficas mediante estadísticos de orden superior. 12º Congreso Español de Ensayos No Destructivos, 2011.

CAPÍTULO 5

CONTRIBUCIONES EN POST-PROCESADO Y ANÁLISIS

En este capítulo se recogen las contribuciones que tienen como objetivo dar solución a problemáticas presentes en diversos procesos industriales mediante el empleo de algoritmos de postprocesado o análisis de secuencias térmicas. Se presentarán diversos métodos de postprocesado que permitan la identificación de Negro de Carbono en textiles militares y la detección de sustancias contaminantes en medio terrestre.

5 Contribuciones en Post-procesado y Análisis

5.1. Introducción

Al aplicar los algoritmos descritos en los capítulos anteriores, donde se han minimizado los efectos de degradación de la señal mediante pre-procesado y se han identificado los defectos y discontinuidades presentes en el espécimen mediante procesado, se obtiene una secuencia térmica a la cual se le aplicaran nuevos algoritmos de postprocesado que permitan caracterizar los defectos encontrados. A esta operación se le conoce como post-procesado o análisis de la secuencia térmica, mediante la cual se obtienen resultados cuantitativos sobre las medidas efectuadas de forma automática.

El análisis de secuencias térmicas aplicando las técnicas, procesos y algoritmos descritos anteriormente permiten aplicaciones en la industria como las que se detallan en los apartados siguientes. Estas aplicaciones permiten determinar, identificar y cuantificar determinados componentes presentes en los materiales sujetos a análisis, incorporando a procesos industriales mecanismos de detección automática en funciones de los intereses marcados, demostrando la amplia aplicación de los ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja para la caracterización de los materiales y sus componentes.

5.2. Identificación de Negro de Carbono en textiles militares

Desde la antigüedad los soldados de un mismo ejército se han vestido empleando un mismo uniforme, aunque estos han ido evolucionando con el tiempo, primero se empleaban uniformes vistosos debido a la necesidad de identificar al enemigo en los combates cuerpo a cuerpo o en medio de la batalla. En el periodo comprendido entre la primera y la segunda guerra mundial, las potencias bélicas comienzan a desarrollar uniformes más adecuados para los sistemas de combate de la época. La guerra de trincheras hace evidente que un uniforme vistoso equivale a un elevado número de bajas en los ejércitos, como pasó con el ejército francés en la primera guerra mundial cuando utilizaron los mismos uniformes vistosos de colores llamativos (azul y rojo) que habían empleado en la Guerra Franco Prusiana. Actualmente la industria militar requiere de uniformes con características particulares dirigidas al enmascaramiento de sus tropas. Estas características que limitan o impiden la detección de los soldados se dividen en distintas categorías: visual, infrarroja, olfativa, sónica, auditiva y por radar. Con este fin, en las últimas décadas se han desarrollado nuevos materiales textiles para ser incorporados en los uniformes militares, uno de los más representativos es el negro de carbono [228][265]. El negro de carbono tiene la capacidad de absorber las radiaciones en el espectro del infrarrojo cercano de modo que los soldados al ocultarse por la noche no pueden ser detectados por las cámaras termográficas ya que los tejidos no permiten detectar el calor corporal humano latente.

Estos uniformes se confeccionan con tejidos o/y fibras que han sido previamente tratados para incluir el negro de carbono [230]. Es aquí donde surge una problemática, la de que el uniforme, desde el punto del camuflaje nocturno, debe ser útil en todo su periodo de vida. Los tejidos tratados con tinturas o estampaciones que incluyen negro de carbono, debido al uso, al lavado y al secado van perdiendo ese tratamiento y por lo tanto pierden capacidad de absorber las radiaciones infrarrojas. Sin embargo, si el negro de carbono está insertado en las propias fibras que forman los tejidos éste no se va a degradar o eliminar con el desgaste del uniforme. Aunque en la actualidad los organismos de control (laboratorios y ejércitos) no toman en cuenta este requisito del negro de carbono en la fibra y solo validan los tejidos que cumplen la especificación de color en el visible y en el infrarrojo en el momento inicial, es de suponer que en el futuro este hecho cambie, en parte por la propia lógica de la durabilidad de los uniformes.

En este sentido, se define un procedimiento de análisis de imágenes infrarrojas con algoritmos asociados para determinar la presencia de negro de carbono en fibras o tejidos en función de la respuesta térmica obtenida al aplicar excitaciones específicas que aportan calor a la muestra.

Como se ha mencionado anteriormente, el negro de carbono se puede incorporar a los tejidos mediante tres procesos (ver Fig. 5. 1):

- Estampación
- Tintura
- Incorporada en la fibra

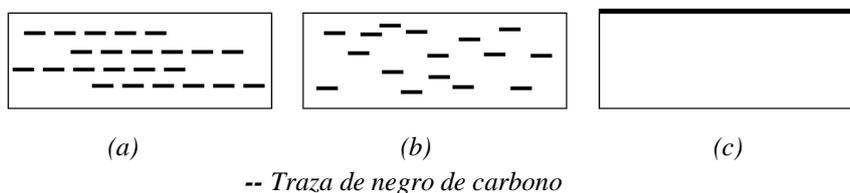


Fig. 5. 1. Incorporada en la fibra (a), tintura (b), estampación (c).

La distribución del negro de carbono varía en función de proceso empleado. En el caso de la estampación el negro de carbono se distribuye únicamente por la cara superficial del tejido. En los otros dos procesos el negro de carbono se distribuye en todo el tejido, con la diferencia de que en el caso de la tintura su distribución es aleatoria y mientras que en la incorporada en la fibra la distribución presenta un patrón uniforme.

Desde el punto de vista de la confección de prendas militares mediante la utilización de tejidos con negro de carbono para impedir la detección nocturna, la clave se encuentra en el ciclo de vida de la prenda militar, en el propio desgaste, lavado y secado. Únicamente en las prendas que poseen tejidos con fibras que incorporan negro de carbono se asegura la propiedad de absorción de radiación infrarroja durante todo su ciclo de vida.

Para realizar este estudio se eligieron 8 tejidos diferentes, 4 crudos y 4 acabados con diferentes tintes y estampados, abarcando varias combinaciones para determinar el comportamiento de los diferentes tejidos con negro de carbono en la fibra, urdimbre o trama, tintura o estampado. Las fibras tienen un espesor de 30 μm y los tejidos tratados de entre 1-3 mm, siendo el tamaño de las muestras de 120 x 100 mm². El estudio se realizó en 5 tipos diferentes de fibras, una de algodón puro, y las restantes de fibras de poliamida y poliéster con y sin negro de carbono. La Fig. 5. 2 resume la identificación y características principales de cada una de las muestras empleadas.

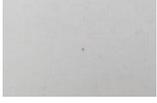
<i>ID.</i>	<i>TEJIDO</i>	<i>COMPOSICIÓN</i>
COPA dp Acabado 8340		NC en tintura y estampado 92% CO, 8% PA blanca
COPA w Acabado 8223		NC en fibra urdimbre Urdimbre: 70% CO, 20% PA blanca, 10% PA gris Trama: 70% CO, 30% PA blanca
COPA wp Acabado 8200		NC en urdimbre y estampado Urdimbre: 70% CO, 20% PA blanca, 10% PA gris Trama: 70% CO, 30% PA blanca
COPEs dp Acabado 121		NC en tintura y estampado 50% CO, 50% PES blanco
COPEs Crudo 110		Sin NC 33% CO, 67% PES blanco
COPA w Crudo 8223		NC en fibra urdimbre Urdimbre: 70% CO, 20% PA blanca, 10% PA gris Trama: 70% CO, 30% PA blanca
CO Crudo 646		Sin NC 100% CO
COPEs we Crudo 2721		NC en trama 67% CO, 33% PES gris

Fig. 5. 2. Características principales de las muestras (NC: Negro de Carbono, CO: Algodón, PA: Poliamida, PES: Poliéster, d: tintura, p: estampado, w: urdimbre, we: trama, blanco: sin NC, gris: con NC).

El objetivo del estudio fue poder detectar mediante el análisis de imágenes infrarrojas la presencia de negro de carbono en tejidos militares identificando aquellos con negro de carbono en sus fibras y distinguiéndolos de aquellos que presentan negro de carbono en

la tintura o estampado. Para ello, se realizó un análisis comparativo de la respuesta térmica de las muestras tras una excitación. Se probaron dos tipos diferentes de excitación, por termografía pulsada (Pulsed thermography) y por termografía de pulso largo (Step-heating thermography) [35, 266]. Se comprobó que los mejores resultados se obtenían con la termografía de pulso largo o step-heating, por lo que el estudio se realizó con dicha excitación utilizando para ello dos parejas de focos con una potencia total 2,6 kW (ver Fig. 5. 3).

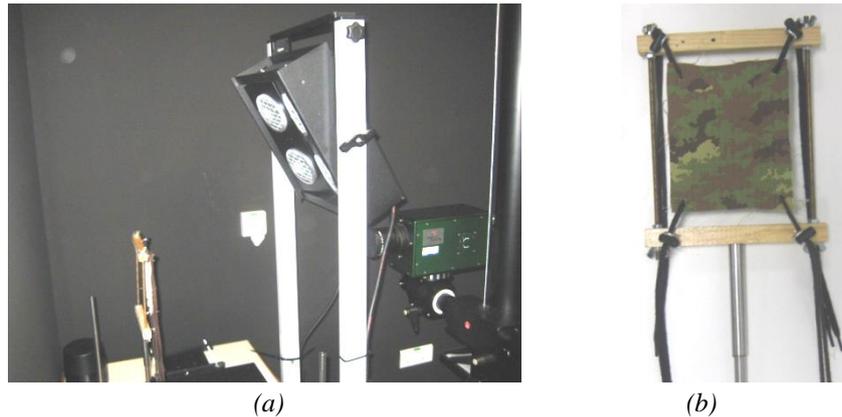


Fig. 5. 3. Set-up para ensayos por termografía de pulso largo (a) y muestra de tejido (b).

Para analizar la respuesta térmica se optó por realizar un ajuste de curva logarítmico neperiana capturando dos valores de la misma, el valor máximo y la pendiente de la curva (ver Fig. 5. 4b), con este par de valores se representó una gráfica para comparar la localización del valor de cada muestra. Identificando los tejidos con negro de carbono en las fibras, por un lado, y aquellos con negro de carbono en tinturas o estampaciones por otro. En las Fig. 5. 5 y Fig. 5. 6 se representan las curvas de las repuestas térmicas de los diferentes tejidos analizados.

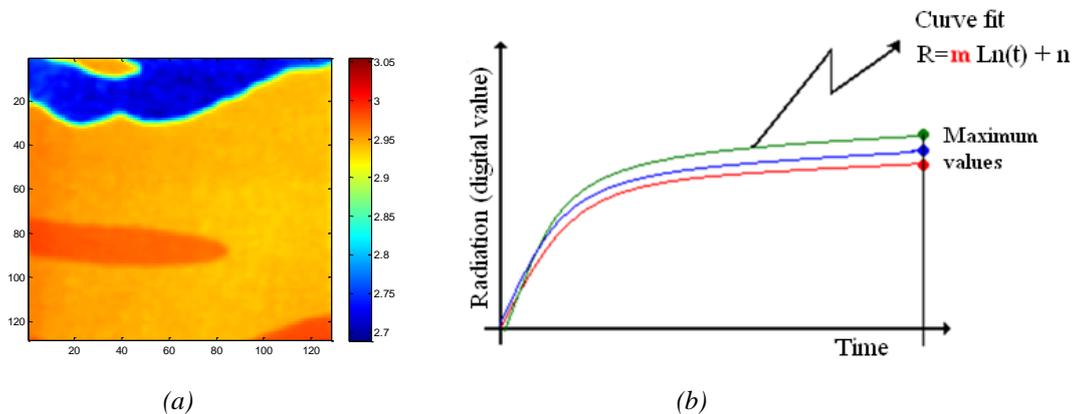


Fig. 5. 4. Termograma de la fibra (a), pares de valores (b), valor máximo y pendiente 'm'.

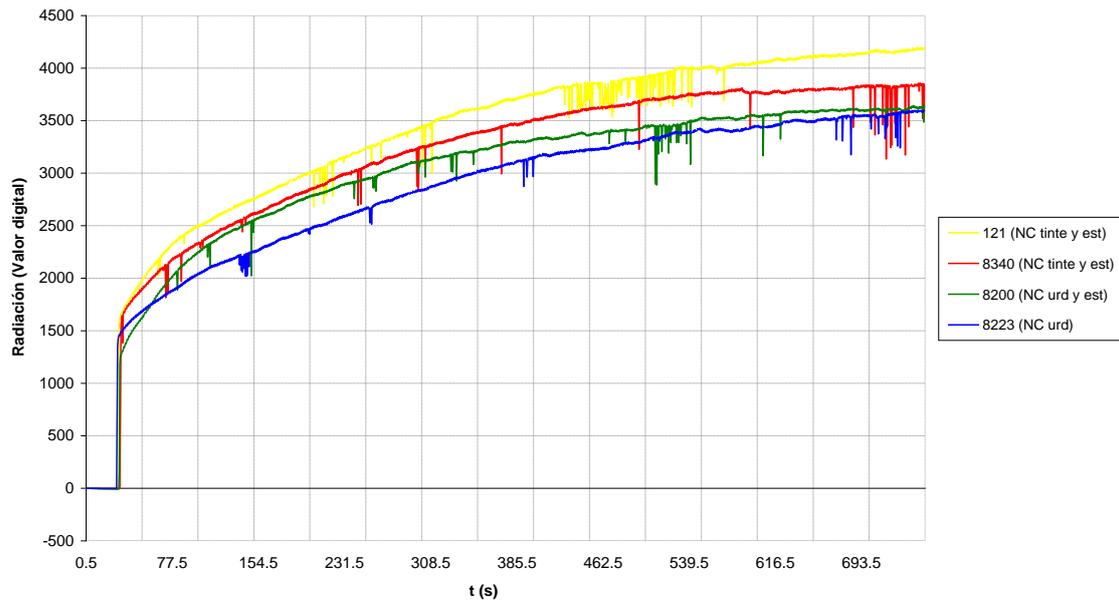


Fig. 5. 5. Respuesta térmica de tejidos acabados.

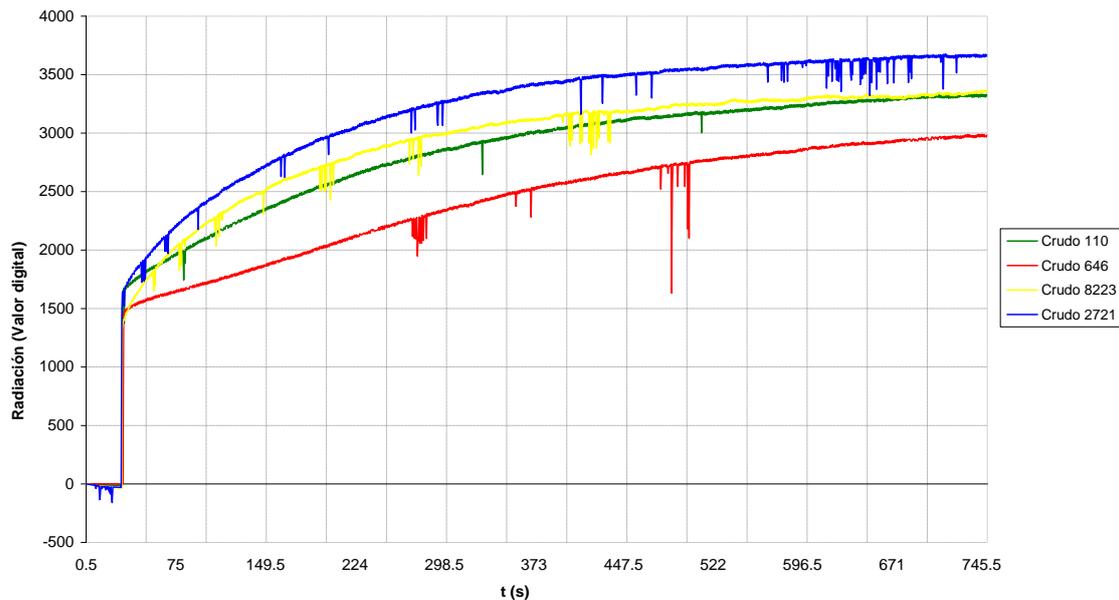


Fig. 5. 6. Respuesta térmica de tejidos crudos.

El estudio comparativo de los pares de valores en una misma gráfica (ver Fig. 5. 7), muestra 3 regiones diferenciadas, correspondientes a los valores de tejidos sin negro de carbono, con negro de carbono en la fibra y con negro de carbono en tinturas y estampaciones. Una vez que se ha observado que cada área es característica para cada tipo de tejido, el proceso se puede automatizar a través de la técnica de estimación de densidad de kernel multivariado, que puede proporcionar los límites entre áreas usando sólo un parámetro después de la determinación de un factor de densidad calculado del diseño de un patrón con muestras con características conocidas.

Para ello, se representa la distribución de la densidad y el valor de 'p', este último se obtiene mediante estimación y se representa en el eje vertical, siendo normalizado con el valor máximo de la distribución dada como una fracción de la unidad. Esto permite estimar los valores de 'm' (pendiente de la curva del ajuste) (ver Fig. 5. 8). A partir de las condiciones definidas para el ensayo, los límites conocidos, y empleando con un planteamiento condicional simple, cualquier tipo de tejido puede ser catalogado (ver Fig. 5. 9).

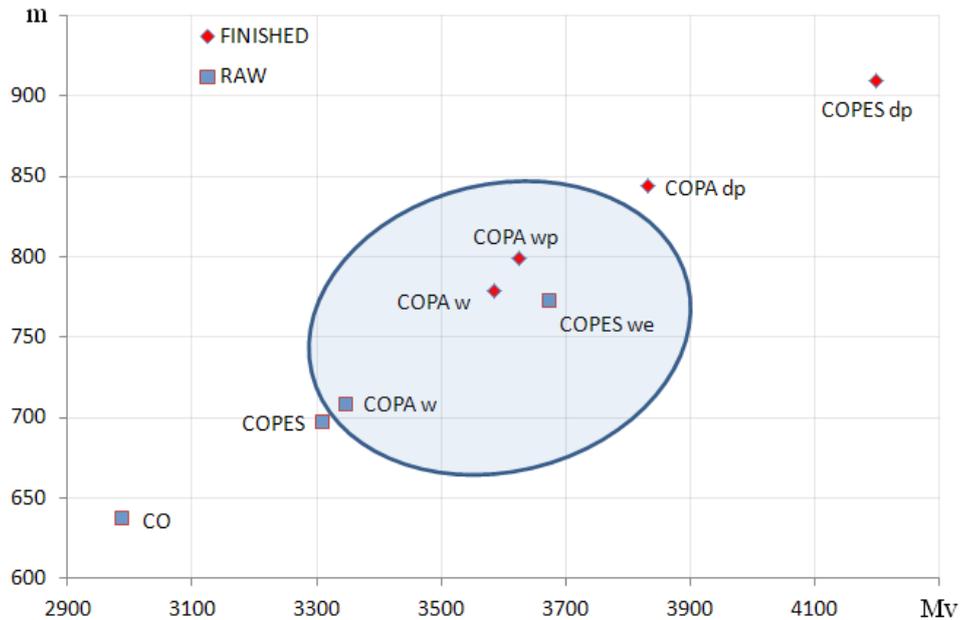


Fig. 5. 7. Pares de valores obtenidos en los ensayos.

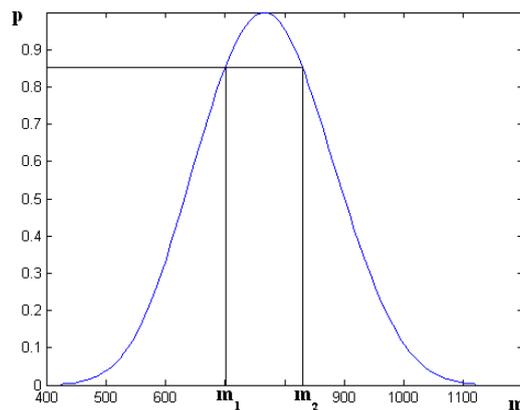


Fig. 5. 8. Distribución de la densidad con los valores de 'm' y 'p'.

Los resultados obtenidos aplicando el procedimiento anteriormente descrito muestran una respuesta térmica característica en función del estado en el que se encuentra el negro de carbono en los tejidos. Por lo cual, se define la técnica de termografía de pulso largo como la más adecuada a emplear en este tipo de estudio.

Se puede observar que los tejidos con negro de carbono en fibra están comprendidos en la región limitada por los valores digitales máximos de la radiación captada y por los valores de la pendiente. En este estudio, se ha estimado un valor de 'p' de 0,85 y los límites resultantes de 'm' son 706,58 y 826,27. De esta forma se puede concluir que es posible discriminar entre tejidos con negro de carbono, dependiendo de su ubicación, ya sea directamente en la fibra o en los tejidos en tintura o en estampado.

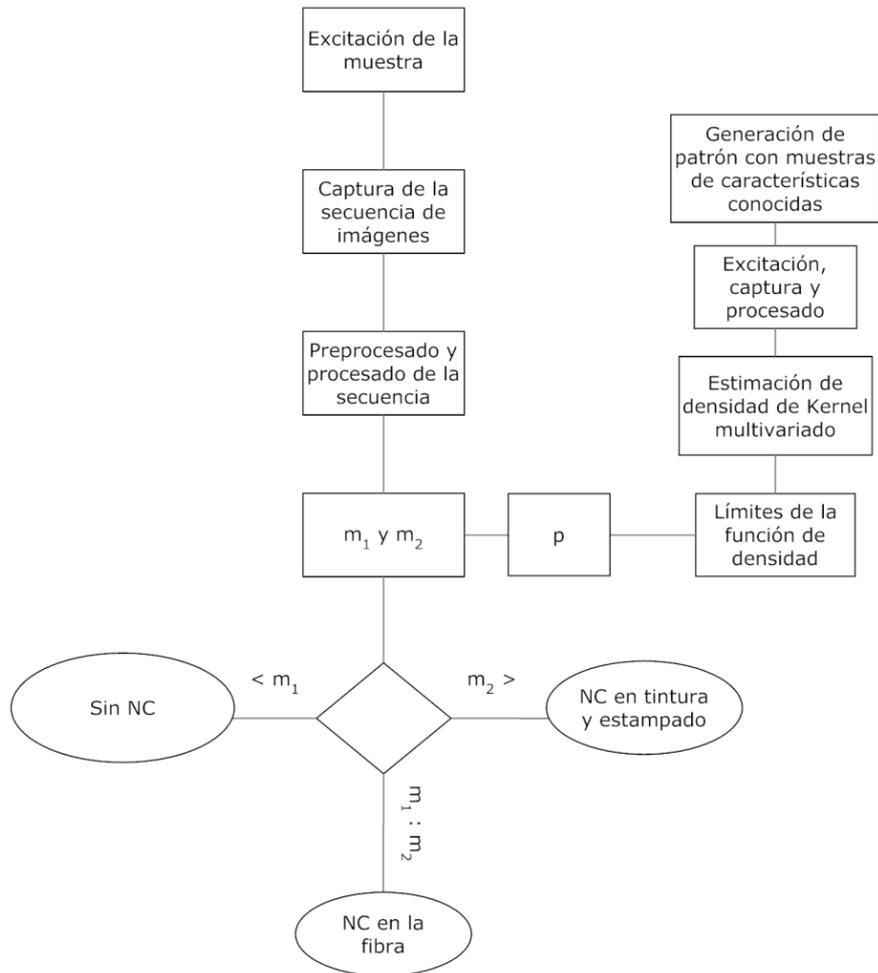


Fig. 5. 9. Diagrama de decisiones.

5.3. Detección de sustancias contaminantes en medio terrestre.

La complejidad de las técnicas actuales en la detección e identificación de suelos contaminados hace necesario el estudio de técnicas alternativas que permitan simplificar estos procesos, por lo cual en este trabajo se estudia la viabilidad del empleo de técnicas mediante ensayos no destructivos (NDT, Non-Destructive Testing), empleando técnicas de termografía infrarroja. El método propuesto para este estudio de viabilidad parte del análisis del modelo térmico del suelo. Dada la complejidad de este modelo, se propone el empleo de modelizaciones mediante la reconstrucción de las secuencias termográficas que permitan simplificar el procedimiento. Posteriormente y mediante el empleo de redes

neuronales artificiales (ANN) se establecerán las resoluciones que permitan discernir y clasificar las muestras analizadas a partir de la presencia o no de contaminantes en las mismas.

En la literatura podemos encontrar diversas técnicas de análisis térmico de suelos, entre las que destacan: las técnicas Termogravimétricas (TG- Thermogravimetry) [210-212, 267], Análisis térmico diferencial (DTA-Differential Thermal Analysis) [210, 213, 214], Calorimetría diferencial de barrido (DSC- Differential Scanning Calorimetry) [210, 215, 268], Espectroscopia de absorción atómica (AAS-Atomic Absorption Spectrophotometry) [217, 269], Cromatografía de gases (GC-Gas Chromatography) [210, 216] y la Espectroscopia infrarroja [270, 271].

En el análisis y caracterización de suelos mediante técnicas de termografía infrarroja se han empleado hasta la fecha diversos métodos tanto activos como pasivos. Por ejemplo, entre los pasivos se encuentran los empleados en la detección de objetos enterrados [223, 272], análisis de la actividad microbiana [273], sitios de eliminación de residuos [274], control de biogás [275] y en el análisis de flujo evaporativos [276]. Entre los activos se presentan los empleados en la detección de la bacteria *Escherichia coli* [277] y la evaluación de la capacidad de disipación de energía [278] en muestras de suelo. Las técnicas de análisis térmico de suelos se basan en el estudio del comportamiento térmico de los materiales que lo componen, así como en los cambios producidos en su estructura y composición química. Estas modificaciones pueden ser analizadas midiendo las variaciones que se producen en las propiedades del material en función de la temperatura.

Actualmente, los métodos empleados en la detección de contaminantes en medio terrestre requieren determinados procesos de tratamiento y remediación altamente costosos. Las perforaciones para el muestreo de suelos, la colección, identificación y preservación de muestras, son procesos que requieren de mucho tiempo y presentan costes considerables. Por lo cual, la detección de contaminantes mediante termografía infrarroja realizando medidas rápidas, fiables y sin contacto, permitiría disminuir los costes y el tiempo consumido para el mismo. Lo anteriormente descrito demuestra la necesidad de realizar un estudio de viabilidad para la detección de contaminantes mediante el empleo de técnicas de medida termográficas que den solución práctica a los problemas económicos, técnicos y temporales que se dan en la actualidad.

Para realizar este estudio de viabilidad es imprescindible analizar el modelo matemático que caracteriza la transferencia térmica en los suelos en función de las condiciones de contorno impuestas y sus características físicas y térmicas. Conocer a fondo este modelo permite la correcta interpretación de los procesos y resultados termográficos obtenidos.

En este estudio se emplearon técnicas termográficas activas, como la termografía de pulso largo [36, 250, 279, 280] y posteriormente se emplearon redes neuronales artificiales [281, 282] con el objetivo de identificar la presencia de contaminante en las muestras.

5.3.1. Formulación del modelo térmico del suelo.

El suelo es un sistema abierto, dinámico y constituido por tres fases. La fase sólida, que está formada por los componentes inorgánicos y los orgánicos, que dejan un espacio de huecos (poros, cámaras, galerías, grietas, etc.) en el que se hallan las fases líquida y gaseosa (principalmente oxígeno y dióxido de carbono). El volumen de huecos está ocupado principalmente por agua que puede llevar iones y sustancias en solución o suspensión, por aire y por las raíces y organismos que viven en el suelo. Todos estos elementos le dan sus propiedades físicas y químicas [283].

Para el modelado térmico, por simplicidad, se hace uso de la suposición de que el suelo es isotrópico y homogéneo, es decir, sus propiedades térmicas son constantes. Además, también se asume que la interfaz aire-suelo (la superficie del suelo) es plana, y la variación del contenido de humedad del suelo en el volumen de las muestras es insignificante durante el período de análisis. Tampoco se toma en cuenta la presencia de vegetación o hierba en el suelo.

El modelo térmico propuesto se presenta para suelos descubiertos sujeto a condiciones de contorno conocidas. Tanto el suelo como los contaminantes presentes en el mismo serán modelados como sólidos isotrópicos [272]. Asumiremos que la variación temporal del contenido de humedad es despreciable. El volumen de suelo se modela como un volumen cúbico (Ω) con una interfaz suelo-superficie (Γ), compuesto por diversos procesos físicos. Este modelo está dado por la ecuación de calor de fase simple en el tiempo (5.3) [40].

$$\frac{\delta T}{\delta t}(x, y, z, t) - \alpha \Delta T(x, y, z, t) = 0 \quad \text{con} \quad \alpha = \frac{k}{\rho c_p} = \frac{k}{c_a} \quad (5.1)$$

donde ρ [kg/m^3] es la densidad, c_p [J/kgK] el calor específico, k [W/mK] la conductividad térmica, c_a [$\text{J}/\text{m}^3\text{K}$] la capacidad calorífica volumétrica, α [m^2/s] la difusividad térmica y T [K] la distribución de temperatura en el sólido.

Con el fin de resolver el sistema se consideran las siguientes condiciones de contorno,

$$\begin{aligned} \frac{\delta T}{\delta t}(x, y, z, t) &= q_{net} & \text{para } \tau \times \Gamma \\ \frac{\delta T}{\delta t}(x, y, z, t) &= 0 & \text{para } \tau \times \delta\Omega \setminus \Gamma \\ T(x, y, z, t = t_0) &= T_0 & \text{en } \Omega \\ T(x, y, z \rightarrow \infty, t) &= T_\infty \end{aligned} \quad (5.2)$$

donde $\tau = \{t_0, \dots, t_f\}$ es el intervalo de tiempo del análisis, Γ es la parte de la superficie accesible para las mediciones, y T_∞ [K] la temperatura del suelo a suficiente profundidad.

La primera condición en (5.2) establece el flujo de calor a través de la porción del contorno del suelo accesible para las medidas (Γ), mientras que el intercambio a través de los otros contornos se asume como nulo (segunda condición). La tercera y cuarta condición en (5.2) representan, la distribución inicial de temperaturas en el suelo y la condición de profundidad del suelo, respectivamente, donde se asume que la temperatura a una cierta profundidad permanece constante [272]. El flujo térmico se establece por la transferencia de calor por convección y radiación, y se introduce a través de la condición de contorno en la interfaz suelo-aire.

$$q_{net} = q_{sun}(t) + q_{rad}(t) + q_{cov}(t) \quad (5.3)$$

donde q_{net} es el flujo neto de calor en la dirección normal a la superficie accesible del suelo para las mediciones, q_{sun} es la radiación solar incidente; q_{rad} es el término de transferencia de calor debido a la radiación que incluye la radiación de onda larga de la atmósfera (q_{sky}) y la emisión del cuerpo de la superficie del suelo (q_{soil}) [284], y q_{conv} es la transferencia de calor sensible de la tierra a la atmósfera debido a la convección.

Como se puede observar, el proceso de transferencia de calor entre el suelo y la atmósfera es un problema complejo que involucra una cantidad importante de variables físicas. Sin embargo, en situaciones prácticas se puede medir un registro de las temperaturas que participan, lo que evita la estimación de los parámetros.

5.3.2. Descripción de las técnicas empleadas

Los experimentos para el estudio de viabilidad se realizaron mediante termografía de pulso largo (step-heating thermography) con el objeto de obtener una secuencia de imágenes con la respuesta térmica adecuada para que al aplicar los diferentes métodos de procesado y mediante el posterior análisis de la misma, permita obtener los valores característicos de cada tipo de muestra contaminada. En los ensayos mediante termografía de pulso largo o step-heating el análisis del proceso de transferencia de calor en el sólido bajo inspección se realiza en su estado transitorio. Para ello se excita la superficie del sólido con una fuente de calor (o frío) durante varios segundos mientras se observa la evolución de la temperatura superficial. Pasado el tiempo de duración del pulso, que es mucho mayor que el de la termografía pulsada (en el rango de segundos o minutos), tiene lugar el proceso de enfriamiento del material que es igualmente almacenado [36, 279]. Centrándonos en el caso más sencillo considerando un sólido isotrópico semi-infinito, la formulación de la transferencia de calor puede expresarse de la siguiente manera [285]:

$$T(t) = F(t) - \delta(t) * F(t - \tau) \quad (5.4)$$

$$F(t) = \frac{2*Q}{k} \sqrt{\frac{\alpha*t}{\pi}}$$

donde $F(t)$ es la respuesta térmica debida a una excitación plana continua de la superficie y k , Q y α son la conductividad térmica, la energía absorbida por la superficie y la difusividad térmica respectivamente.

En el estudio se partió de 4 grupos de muestras de suelo con diversos niveles de contaminación por plomo. Las muestras empleadas siguen la distribución siguiente:

- Muestra 0: sustrato únicamente
(*Muestra de tierra limpia*), (*peso 500g*).
- Muestra 1: 3 muestras con concentraciones bajas de plomo
150 mg de plomo/kg de tierra, (*peso 500g*).
- Muestra 2: 3 muestras con concentraciones medias de plomo
500 mg de plomo/kg de tierra, (*peso 500g*).
- Muestra 3: 3 muestras con concentraciones altas
1000 mg de plomo/kg de tierra, (*peso 500g*)

Las propiedades básicas de la tierra (sustrato) empleada en este estudio fueron: turba, arcilla, guano, AGROSIL, cal y elementos nutrientes, con un $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ entre 5,0 y 6,5, un contenido de sal (KCl) <3.0 g/l, un contenido de fertilizante entre 200 y 450 mg/l nitrógeno (N), y nutrientes solubles como el fosfato (P_2O_5) (200-500 mg/l) y oxido de potasio (K_2O) (300-600 mg/l). Todas las muestras fueron elaboradas en una cabina Filtair 834 empleando una disolución de plomo en agua para agregar el contaminante en las muestras. Posteriormente, las muestras son calentadas en un horno MEMMERT UNB 100 para eliminar el exceso de humedad. Para concluir, las muestras son etiquetadas y manipuladas según las normas ASTM establecidas. Durante los ensayos, se controlan las condiciones de contorno de todas las muestras con el objetivo de garantizar que el contenido de humedad, la temperatura y el peso de las mismas sea el mismo en todas las muestras, evitando así, cualquier tipo de efecto negativo que pueda alterar los resultados. Antes de cada ensayo, el contenido de humedad de las muestras fue medido, obteniendo resultados entre 52% y 54%.

Mediante los termogramas resultantes, se obtiene la evolución térmica de las muestras con y sin contaminante. A partir de los termogramas más representativos, se obtienen las diferencias entre las propiedades térmicas del contaminante con diferentes niveles de contaminación, lo cual es empleado para detectar y discriminar las diferentes muestras. Los datos obtenidos a nivel de superficie por la cámara infrarroja son almacenados como un conjunto de imágenes infrarrojas que luego son empleadas para analizar el comportamiento térmico de las muestras.

En la Fig. 5. 11 se muestra la configuración de los ensayos empleando termografía activa de pulso largo para el análisis de las muestras de suelo contaminado mencionadas anteriormente. Las muestras de tierra ③ se excitan mediante 4 focos Flash PAR-36L/S ② de 250 W de potencia, centrados respecto a la muestra con una separación de 0,46 m a una altura de 0,5 m.

Las secuencias termográficas son capturadas a través de una cámara termográfica Thermosensorik CMT 128 SM ❶, trabajando en un ancho de banda de 1,5 a 5 μm , situada a una altura de 0,6 m respecto a la muestra. Ésta se encuentra conectada a una unidad de captura y procesado de datos ❷.

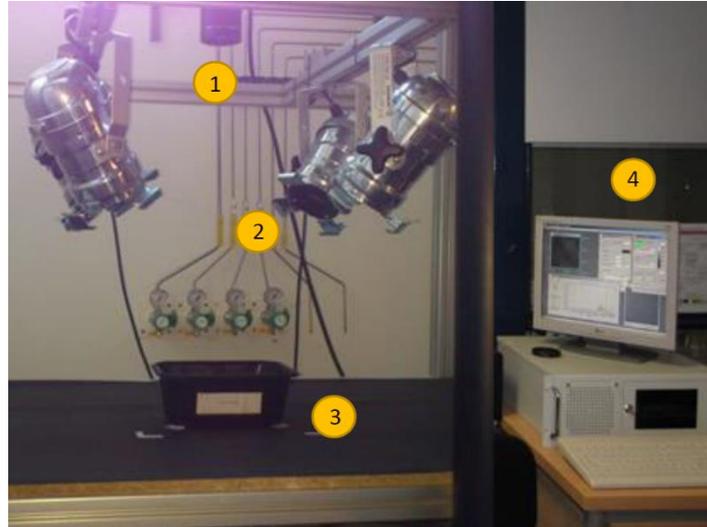


Fig. 5. 10. Configuración empleada en los ensayos mediante termografía de pulso largo.

El análisis de las muestras se centra en la etapa de calentamiento de la respuesta térmica, en particular en la rampa de calentamiento correspondiente al inicio del mismo, acotado a un segundo. Debido a este corto intervalo de tiempo, se emplea una velocidad de captura de la cámara termográfica de 600 FPS. En la Fig. 5. 11 se muestran algunos ejemplos de los termogramas obtenidos para las muestras analizadas.

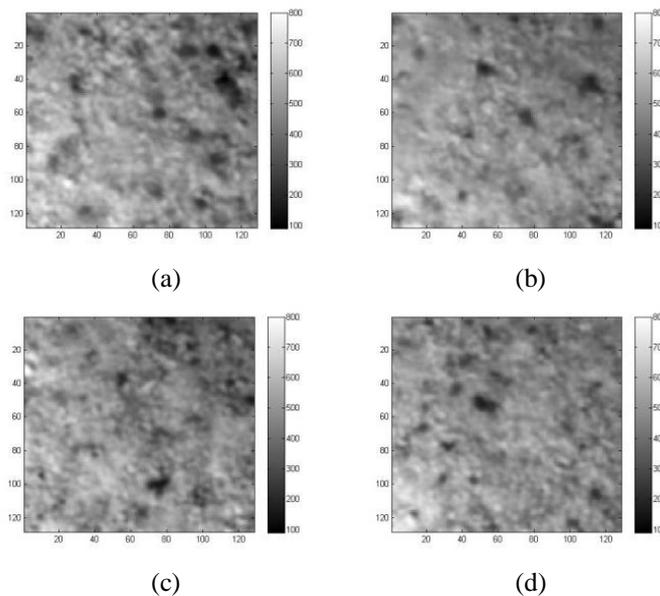


Fig. 5. 11. Termogramas de algunas de las muestras analizadas. Sustrato (a), Pb1.3 (b), Pb2.3 (c), Pb3.3 (d).

En la Fig. 5. 12 se muestra la curva de la respuesta térmica de una muestra de la secuencia de imágenes termográficas obtenidas mediante termografía activa de pulso largo, donde se puede apreciar la etapa de calentamiento y de enfriamiento. Para eliminar las reflexiones adversas debido a la radiación ambiental, se aplica a la secuencia de termogramas obtenida una corrección de ruido de patrón fijo. Para esta corrección se emplea un termograma promedio resultante de los 10 primeros termogramas obtenidos previo al pulso de calor [286].

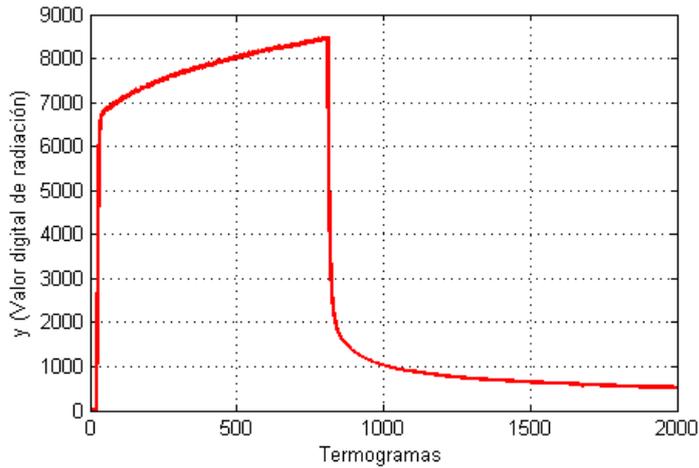


Fig. 5. 12. Evolución térmica promedio de la secuencia de datos.

Para el análisis e interpretación de los datos obtenidos mediante termografía de pulso largo se empleó el método de reconstrucción de secuencias termográficas (TSR) [35] haciendo uso de un ajuste polinómico de grado 6 (ver Fig. 5. 13).

$$f(x) = Ax^6 + Bx^5 + Cx^4 + Dx^3 + Ex^2 + Fx + G \tag{5.5}$$

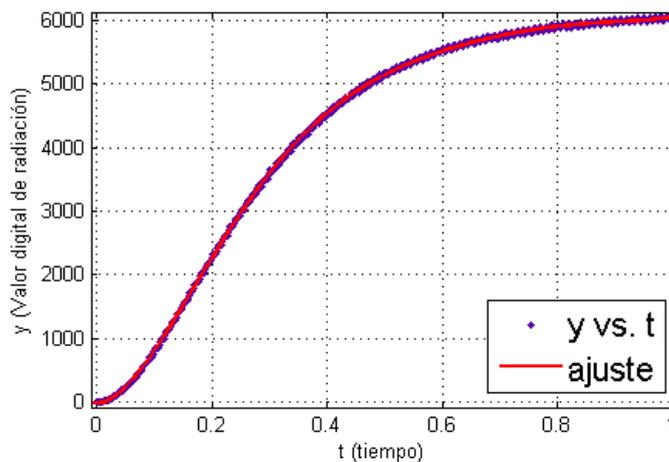


Fig. 5. 13. Ajuste por polinomio de grado 6 en el calentamiento.

En el siguiente paso del estudio de viabilidad se emplean redes neuronales artificiales (ANN) estableciéndose como base los valores de los coeficientes obtenidos a partir de la reconstrucción de la secuencia con el ajuste polinómico de grado 6. De esta forma se constituye un análisis automático de los resultados capaz de clasificar (a partir del entrenamiento previo) las muestras en función del nivel de contaminante presente en las mismas.

5.3.3. Redes neuronales artificiales: Aplicación y resultados

Las redes neuronales artificiales (Artificial Neural Network - ANN) son herramientas de procesado muy útiles para solucionar problemas complejos gracias a sus características, como la robustez, paralelismo o capacidad de generalización y aprendizaje [281, 287]. Se pueden emplear en diversos ámbitos como en el diagnóstico de enfermedades o visión artificial [288]. En este trabajo se han empleado para detectar la presencia de contaminante en suelos.

Una ANN es una estructura compuesta por un conjunto de elementos sencillos, denominados neuronas, que simulan el comportamiento del sistema nervioso biológico. Dichas neuronas están interconectadas entre sí mediante enlaces, que poseen un determinado peso [288]. Cada una de las neuronas suma todas sus entradas previamente multiplicadas por su peso correspondiente. Posteriormente, el resultado del sumatorio se compara con un valor umbral y si lo supera, a continuación dicho valor se introducirá en una función de activación, como por ejemplo una función escalón [289].

Las redes neuronales se componen generalmente de tres capas: datos de entrada (input data), capa oculta (hidden layer) y capa de salida (output layer), como se puede observar en la Fig. 5. 14. Es importante seleccionar bien el número de neuronas de la capa oculta (hidden layer), puesto que una escasez de ellas no ajustaría bien la red y un exceso eliminaría la propiedad de generalización de la misma [281].

Como ya se ha comentado previamente, una de las principales características de las ANN es su capacidad de aprendizaje. Las redes sufren un procesado de entrenamiento en el cual se les indica los valores de salida correspondientes a unos determinados valores de entrada. Durante este proceso se van ajustando los valores que deben tomar los pesos de las conexiones de manera que se vaya reduciendo el error cometido a la salida. Este tipo de entrenamiento se denomina entrenamiento supervisado. Por otro lado, existe otro tipo de entrenamiento no supervisado en el cual únicamente se le introduce a la red los datos de entrada y ésta va aprendiendo a partir de los resultados de entrenamientos previos [288]. En cualquiera de los dos casos, cuanto mayor sea el número de patrones de entrenamiento de la red, mejor será el funcionamiento de la misma. Existen varios tipos de redes neuronales, como por ejemplo: function approximation, clustering, pattern classification, optimization or forecasting [281]. Entre las diferentes clases existentes de redes neuronales artificiales, se ha elegido la de reconocimiento de patrones, por ser la que mejor se adapta al problema propuesto.

De las redes utilizadas en el estudio realizado se seleccionaron las dos configuraciones con mejores resultados: la primera de ellas compuesta por una capa oculta simple de cuatro neuronas (Fig. 5. 14a) y la segunda, con una capa oculta doble formada por cuatro y dos neuronas respectivamente (Fig. 5. 14b).

A continuación, se muestran las estructuras de las redes neuronales artificiales empleadas.

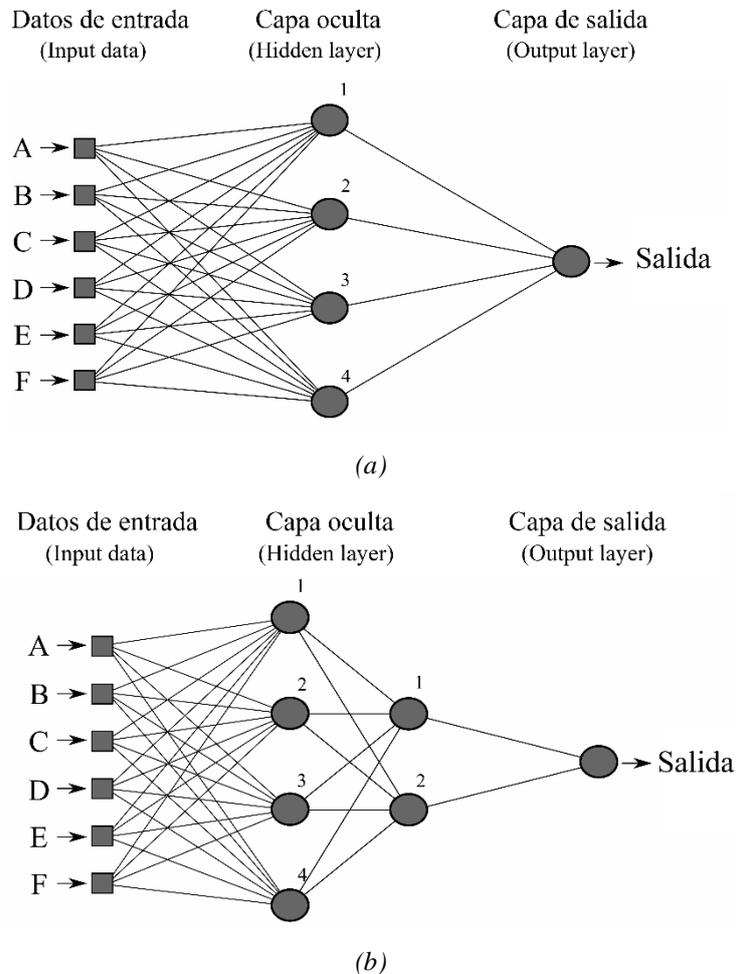


Fig. 5. 14. Redes neuronales artificiales utilizadas en el estudio.

Como parámetros de entrada a las redes neuronales se han introducido los coeficientes del polinomio de ajuste de la respuesta térmica obtenida durante los ensayos realizados mediante termografía de pulso largo (el coeficiente independiente del ajuste realizado, G, no se tiene en cuenta puesto que no aporta información relevante). Dichas redes proporcionan un único parámetro de salida. Este tomará el valor positivo en caso de que se estime que el suelo está contaminado y, valor negativo en caso contrario. Los parámetros importantes para evaluar la viabilidad del método son los denominados falsos positivos y falsos negativos. Los falsos positivos se dan cuando la red estima que el suelo está contaminado cuando realmente no lo está. Los falsos negativos por el contrario indican que el suelo está limpio cuando en verdad está contaminado [287].

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con las dos redes empleadas. Con la red neuronal de hidden layer simple se obtiene una tasa de falsos negativos del 4,54 % y una tasa de falsos positivos del 37,93 %, tal como se muestra en la Fig. 5. 15. Por otro lado, con la red neuronal de hidden layer doble (Fig. 5. 16) se obtiene una tasa de 6,67 % y 20,69 % de falsos negativos y falsos positivos correspondientemente.

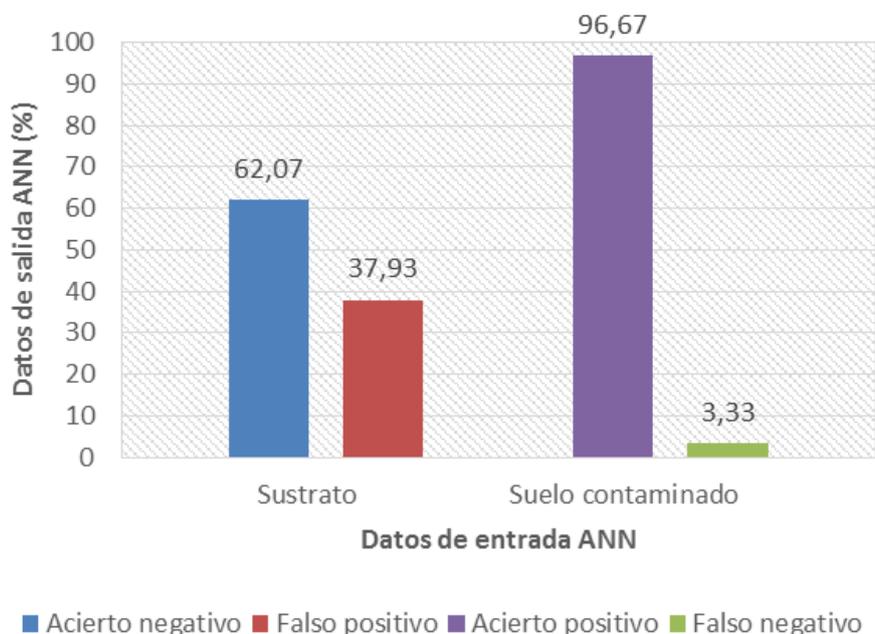


Fig. 5. 15. Resultados obtenidos mediante la ANN con capa oculta simple.

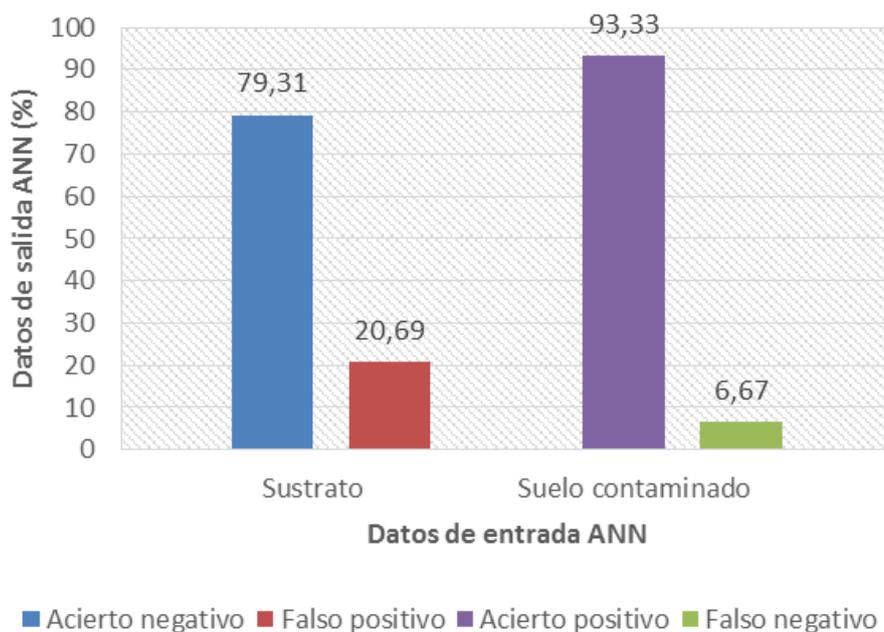


Fig. 5. 16. Resultados obtenidos mediante la ANN con capa oculta doble.

En general, el estudio muestra mejores resultados en la identificación de muestras contaminadas frente a las muestras no contaminadas. A partir de los datos anteriores se deduce que es posible mejorar el parámetro de falsos positivos a cambio de empeorar ligeramente el correspondiente a falsos negativos.

5.3.4. Conclusiones parciales

El estudio se basó en la diferencia entre las propiedades térmicas del contaminante (Pb) y las del sustrato, representado como diferencias en la respuesta térmica de las muestras. Para ello se realizaron ensayos mediante el empleo de termografía de pulso largo en muestras con diferentes niveles de contaminación (muestra no contaminada, poco contaminada, parcialmente contaminada y muy contaminada), distribuidas en dos grupos con el objetivo de detectar la presencia o no de contaminantes. A partir de los datos obtenidos en los ensayos se emplearon diversas técnicas de pre-procesado seleccionando la aproximación por ajuste polinómico de grado 6 para el análisis de la respuesta térmica de las muestras. Los coeficientes obtenidos en el ajuste realizado se utilizaron como datos de entrada para el desarrollo de una red neuronal, herramienta de procesado entrenada para la detección de contaminante en las muestras. Los mejores resultados para detectar tierra contaminada con Pb con un error del 3,33% se logran con una red neuronal con capa oculta simple (simple hidden layer ANN). Sin embargo, el resultado presenta un alto número de falsos positivos que se consiguen reducir con una red neuronal con capa oculta doble (double hidden layer ANN) pero aumentando los falsos negativos

Publicaciones propias

Las contribuciones presentadas a lo largo de este capítulo han dado lugar a dos publicaciones en revistas internacionales:

- J. Andrés, R. Hidalgo-Gato, J. López-Higuera and F. Madruga, "Identification of Carbon Black in Military Textiles Using Infrared Imaging Techniques," *Optics and Photonics Journal*, Vol. 3 No. 4A, 2013, pp. 27-30. doi: 10.4236/opj.2013.34A005.
- R. Hidalgo-Gato, L. González de Ulloa, J.R. Andrés, S. Martínez, A. Pérez, F.J. Madruga, J.M. López-Higuera, "A thermographic step-heating technique for metallic pollutant detection in soils", *Infrared Physics & Technology*, 2015.

PARTE III

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En esta parte se presentarán las conclusiones más significativas derivadas de los resultados obtenidos en las diferentes contribuciones científico-técnicas presentadas en este trabajo de tesis, así como las publicaciones derivadas. De la misma forma se expondrán las líneas futuras de investigación que darán continuidad a las investigaciones recogidas en este trabajo de tesis.

Capítulos:

6. Conclusiones y líneas futuras

6 Conclusiones y líneas futuras

6.1. Conclusiones

En este trabajo de tesis se han presentado las contribuciones científicas realizadas a los ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja activa, las cuales han permitido inspeccionar y evaluar diversos materiales y componentes sin afectar su utilidad (sin contacto). Los resultados alcanzados han pretendido contribuir a la simplificación de diversos procesos industriales de control de calidad de materiales y componentes, permitiendo posicionar a las técnicas de análisis mediante termografía infrarroja como una alternativa fiable y precisa en este campo. Los resultados derivados de los trabajos de investigación realizados han permitido dar respuesta a los objetivos planteados en el capítulo 2. Las contribuciones desarrolladas en este trabajo de tesis se han distribuido en tres grupos principales donde se han presentado las aportaciones a los métodos de Pre-procesado (capítulo 3), Procesado (capítulo 4) y Análisis (capítulo 5) de secuencias de termogramas obtenidas a partir de ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja activa.

En el capítulo 3 se presentó la propuesta de combinación de diversos métodos de preprocesado de termogramas aplicados a secuencias térmicas obtenidas de procesos de evaluación de soldadura por arco sumergido (SAW) para disminuir los efectos producidos por vibraciones. Los resultados obtenidos en este capítulo han permitido demostrar que la estabilización de secuencias térmicas mediante el empleo del método propuesto ofrece una solución válida a los procesos de evaluación no destructiva de procesos de análisis de soldadura en línea. El empleo de la función de ventana de tukey con las modificaciones realizadas mejora significativamente el proceso de estabilización, el método DPS empleado corrige los movimientos de la imagen restantes después de aplicar el método POT, obteniéndose como resultado una secuencia térmica final estabilizada y lista para el posterior análisis térmico.

En el capítulo 4 se han propuesto 3 nuevas técnicas de procesado de secuencia térmica, 2 basadas en estadísticos de orden superior (Skewness y Kurtosis) y otra basada en una técnica híbrida, Contraste absoluto de fase (PhAC), que mezcla las ventajas y disminuye las desventajas de varias técnicas de procesado. La bondad de estas nuevas técnicas se han analizado aplicando la medida de la relación SNR, comparándola con otras técnicas conocidas (DAC, PPT, PCA, etc.).

Para comprobar la bondad y robustez de los métodos empleados: se realizaron medidas en muestras de 3 materiales diferentes, se emplearon materiales con distintas geometrías y se aplicaron distintas excitaciones para comprobar su robustez a iluminación o excitación diferente. Al ser 2 de los métodos estadísticos se han comprobado su robustez al número de termogramas capturados (enventanado).

A partir del estudio de cuantificación de bondad de las técnicas de procesado seleccionadas mediante el cálculo de la relación señal-ruido se ha podido comprobar que la identificación de los defectos estará condicionada por las características que posean (geometría, profundidad, etc.) y por tanto estos resultados variarán en dependencia de los métodos de procesado que se empleen. Mediante los resultados obtenidos en los diferentes materiales empleados en el estudio se pudo comprobar que los métodos de procesado que ofrecen mejores resultados son: el análisis por componentes principales (PCT) y el contraste absoluto de fase (PhAC). La detección de defectos no deseados en algunos de los especímenes demuestra la validez de las técnicas empleadas en la identificación de discontinuidades y defectos que puedan producirse durante los procesos de fabricación de estos materiales, permitiendo la incorporación de estos análisis en los procesos de inspección de calidad, ofreciendo alternativa rápida y sencilla a las técnicas empleadas en la industria para la evaluación de los mismos.

Las contribuciones presentadas en el capítulo 5 dan solución a las problemáticas detectadas en diversos procesos industriales mediante el empleo de algoritmos de post-procesado o análisis de secuencias térmicas. Los resultados obtenidos en el método propuesto para la identificación de Negro de Carbono en textiles militares, permitieron definir la técnica de termografía de pulso largo como la más adecuada a emplear en este tipo de estudio. Los perfiles de la respuesta térmica obtenida en cada muestra permitieron la caracterización de las mismas en función del estado del negro de carbono en los tejidos, delimitando por regiones los valores digitales máximos de la radiación captada y los valores de la pendiente. De esta forma se ha podido comprobar la posibilidad de discriminar entre tejidos con negro de carbono, dependiendo de su ubicación, ya sea directamente en la fibra o en los tejidos en tinte o en estampado empleando algoritmos de post-procesado obtenidos mediante ensayos no destructivos por termografía infrarroja activa. Con ello, se ofrece una alternativa rápida y sencilla a los procesos de evaluación de calidad de los tejidos.

Los resultados obtenidos en el método propuesto para detección de sustancias contaminantes en medio terrestre permitieron evaluar la viabilidad del empleo de las técnicas infrarrojas en los procesos de detección de sustancias potencialmente contaminantes en suelos. El estudio realizado se basó en la caracterización del perfil de la respuesta térmica del contaminante seleccionado (Plomo - Pb) y el sustrato no contaminado a partir de ensayos mediante termografía de pulso largo. Los parámetros obtenidos en el análisis de las muestras para distintos niveles de contaminación (muestra no contaminada, poco contaminada, parcialmente contaminada y muy contaminada) se emplearon posteriormente como datos de entrada para el desarrollo de una red neuronal, previamente entrenada para la detección de contaminante en las muestras. A partir de los resultados obtenidos se pudieron identificar tanto las muestras contaminadas como las que no lo estaban, obteniendo mejores resultados en la detección de muestras con presencia de contaminantes. Mediante este estudio se pudo comprobar la viabilidad de este método de detección de contaminantes como alternativa válida a los procesos industriales actuales.

6.2. Publicaciones derivadas de la tesis.

Este trabajo de tesis ha sido fuente de varias contribuciones científicas. A continuación se presenta un breve esquema donde se describe la distribución de las publicaciones desarrolladas a partir de los trabajos de investigación realizados.

Tipo de publicación		Nº de Contribuciones		
		Tesis	Otras	
Internacional	Revistas	4	-	4
	Congresos	-	1	1
Nacional	Revistas	1	1	2
	Congresos	3	2	5
Suma parcial		8	4	
TOTAL		12		

R. Hidalgo-Gato, et al., “*Pre-processing techniques of thermal sequences applied to online welding monitoring*”, Quantitative InfraRed Thermography Journal, 2012. **9**(1): p. 69-78.

R. Hidalgo-Gato, J.R.A., J.M. López-Higuera, F.J. Madruga, *Ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja*. AEND (Asociación española de ensayos no destructivos), 2013. **62**: p. 24-35.

Hidalgo-Gato, R., et al., “*Quantification by signal to noise ratio of active infrared thermography data processing techniques*”. Optics and Photonics Journal, 2013. **3**(04): p. 20.

F.J. Madruga, O. Conde, R. Hidalgo-Gato, P. Albendea, J.M. López-Higuera, “*Procesado de secuencias termográficas mediante estadísticos de orden superior*”, 12º Congreso Español de Ensayos no Destructivos, ISBN: 9788469440766, 2011.

J. Andrés, R. Hidalgo-Gato, J. López-Higuera and F. Madruga, “*Identification of Carbon Black in Military Textiles Using Infrared Imaging Techniques*”, Optics and Photonics Journal, Vol. 3 No. 4A, 2013, pp. 27-30. doi: 10.4236/opj.2013.34A005.

R. Hidalgo-Gato, L. González de Ulloa, J.R. Andrés, S. Martínez, A. Pérez, F.J. Madruga, J.M. López-Higuera, “*A thermographic step-heating technique for metallic pollutant detection in soils*”, Infrared Physics & Technology, 2015.

R. Hidalgo-Gato, L. González de Ulloa, J. R. Andrés, S. Martínez, A. Pérez, F. J. Madruga, J. M. López-Higuera, “*Viabilidad de detección de contaminación por plomo en suelos mediante termografía de pulso largo*”, IX Reunión Española de Optoelectrónica, 2015.

F. J. Madruga, R. Hidalgo-Gato, M. M. Lomer, J. M. López Higuera, “*Detección de defectos mediante termografía activa en materiales diversos*”, 13º Congreso Nacional de Ensayos No Destructivos, pp. 881–890, ISBN 9788460675655, Sevilla, 2015.

R. Hidalgo-Gato, J. R. Andrés, J. M. López-Higuera, F. J. Madruga, “*Cuantificación mediante relación señal-ruido de técnicas de procesado en termografía infrarroja activa*”, OPTOEL 2013. VIII Reunión Española de Optoelectrónica, Madrid, 2013.

6.2.1. Publicaciones en revistas internacionales

1. R. Hidalgo-Gato, et al., “*Pre-processing techniques of thermal sequences applied to online welding monitoring*”, Quantitative InfraRed Thermography Journal, 2012. **9**(1): p. 69-78.
2. Hidalgo-Gato, R., et al., “*Quantification by signal to noise ratio of active infrared thermography data processing techniques*”. Optics and Photonics Journal, 2013. **3**(04): p. 20.
3. J. Andrés, R. Hidalgo-Gato, J. López-Higuera and F. Madruga, “*Identification of Carbon Black in Military Textiles Using Infrared Imaging Techniques*”, Optics and Photonics Journal, Vol. 3 No. 4A, 2013, pp. 27-30. doi: 10.4236/opj.2013.34A005.
4. R. Hidalgo-Gato, L. González de Ulloa, J.R. Andrés, S. Martínez, A. Pérez, F.J. Madruga, J.M. López-Higuera, “*A thermographic step-heating technique for metallic pollutant detection in soils*”, Infrared Physics & Technology, 2015.

6.2.2. Publicaciones en revistas nacionales

5. F. J. Madruga, J. R. Andrés, R. Hidalgo-Gato, J. M. López-Higuera, “*Termografía infrarroja como técnica de diagnóstico en edificación*”, Cursos avanzados: Evaluación, Intervención y Mantenimiento de Edificios y Estructuras, pp. 21-31, ISBN 8472924116, 2013.
6. R. Hidalgo-Gato, J.R.A., J.M. López-Higuera, F.J. Madruga, *Ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja*. AEND (Asociación española de ensayos no destructivos), 2013. **62**: p. 24-35.

6.2.3. Publicaciones en congresos nacionales

7. R. Hidalgo-Gato, L. González de Ulloa, J. R. Andrés, S. Martínez, A. Pérez, F. J. Madruga, J. M. López-Higuera, “*Viabilidad de detección de contaminación por plomo en suelos mediante termografía de pulso largo*”, IX Reunión Española de Optoelectrónica, 2015.

8. F. J. Madruga, R. Hidalgo-Gato, M. M. Lomer, J. M. López Higuera, “*Detección de defectos mediante termografía activa en materiales diversos*”, 13º Congreso Nacional de Ensayos No Destructivos, pp. 881–890, ISBN 9788460675655, Sevilla, 2015.
9. F. J. Madruga, M. M. Lomer, R. Hidalgo-Gato, J. M. López Higuera, “*Imágenes digitales de speckle aplicada a ensayos no destructivos*”, 13º Congreso Nacional de Ensayos No Destructivos, Sevilla, 2015.
10. R. Hidalgo-Gato, J. R. Andrés, J. M. López-Higuera, F. J. Madruga, “*Cuantificación mediante relación señal-ruido de técnicas de procesado en termografía infrarroja activa*”, OPTOEL 2013. VIII Reunión Española de Optoelectrónica, Madrid, 2013.
11. F. J. Madruga, O. M. Conde, R. Hidalgo-Gato, P. Albendea, J. M. López-Higuera, “*Procesado de secuencias termográficas mediante estadísticos de orden superior*”, 12º Congreso Español de Ensayos No Destructivos, pp. 521-530, ISBN 9788469440766, Valencia, 2011.

6.2.4. Publicaciones en congresos internacionales

12. J. M. López-Higuera, L. Rodríguez, A. Quintela, R. Hidalgo-Gato, H S. Girgis, “*Temperature level optical fiber sensor using shape memory alloy wires*”, 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, Beijing, China, 2012.

6.3. Líneas futuras

Las contribuciones desarrolladas en este trabajo de tesis han dado solución a los objetivos planteados inicialmente en el capítulo 2. En algunas de ellas, han surgido nuevas inquietudes o trabajos que pueden derivar en nuevas líneas de investigación futuras en las cuales se podría continuar contribuyendo al conocimiento científico-técnico de este campo de estudio.

Con respecto a los métodos de procesado:

- Uso de técnicas Lock-in para determinar su bondad para medidas en Kevlar, dado que este material no ha sido demasiado ensayado con termografía.

Con respecto a los métodos análisis:

- Definición de nuevos parámetros que representen las perturbaciones en el patrón térmico del suelo en las muestras contaminadas.
- Desarrollo de nuevas pruebas empleando otras sustancias contaminantes.

PARTE IV

ANEXOS Y BIBLIOGRAFIA

Capítulos:

7. Anexos
8. Bibliografía

CAPÍTULO 7

ANEXOS

ANEXO A: EQUIPAMIENTO UTILIZADO

**ANEXO B: ESTUDIO DE DEGRADACIÓN DE ACEITE MINERAL
CON TERMOGRAFÍA**

**ANEXO C: DESARROLLO DE PROTOTIPO PARA LA DETECCIÓN
DE SUELOS CONTAMINADOS**

A: Equipamiento Utilizado

A continuación se presenta la información técnica referente a la instrumentación empleada en la realización de las diferentes contribuciones presentadas en este trabajo de tesis.

- **Cámara IR: Thermosensorik CMT 128 SM**

Detector FPA

CMT (Cadmio-Mercurio-Teluro)

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 cuerpo negro: Gemini R Isotech 976**

Rango de temperatura: 30°C-550°C

Emisividad: > 0.995

Estabilidad: ± 0.5°C

Resolución de pantalla: 0.01°C a99.99;
0.1°C desde 100 a 550

Tiempo de calentamiento: 45 min

Diámetro de apertura: 65 mm

Profundidad de la cavidad: 160 mm

Interfaz a PC: incluida

Potencia: 1000 W

Voltaje: 100-130 o 208-240 Vac
50/60 Hz

Dimensiones: 310x265x200mm

Peso: 10Kg



- Fuentes de excitación

Flash Elinchrom Digital SE 2400-Rx (2)



Potencia: 3 kW
 Peso: 2.4 kg
 Dimensiones: 220x140mm
 Duración del pulso: 1.6ms

Flash PAR-36L/S (4)



Potencia: 250W
 Peso: 0.4kg, $T_{amb, max}: 45^{\circ}C$,
 Dimensiones: 160x160x270 mm
 Distancia mínima: 1m

- Accesorios

Digital RX 2400 Power Pack



Dimensiones: 215x135x320 mm
 Velocidad de carga: 0.5 – 2 s
 Duración del flash (dos focos): 1/950 s

**Soporte cámara:
 Manfrotto 809 Salon 230 Stand**



Altura: $h_{max}: 2210mm$, $h_{min}: 572mm$
 Longitud max. del brazo: 610mm
 Peso: 64kg

- **Cámara IR: Empiricam MR**

Detector: Microbolómetro no refrigerado, tipo FPA

Tamaño de imagen: 384x288.

Frecuencia de captura de imágenes: 10 fps

Profundidad de bit: 14 bits (16,384 niveles)

Banda espectral extendida: 8 a 14 μm .



- **Medios de protección para ensayos con plomo**



(a)



(b)

Fig. A1. Mascarilla con filtro P3 (a) y gafas de protección (b) para los ensayos con mercurio.

B: Estudio de degradación de aceite mineral con termografía

Las técnicas actuales empleadas en la detección de vertidos de sustancias potencialmente contaminantes en suelos, y como se ha descrito anteriormente en el Capítulo 5 de este trabajo de tesis, presentan una gran complejidad y están compuestas por procesos altamente costosos. Como ha quedado demostrado en el caso de los metales pesados, el empleo de técnicas de medida mediante termografía infrarroja permite la detección de estas sustancias contaminantes en muestras de suelo de forma rápida y sencilla. Una de las sustancias contaminantes con mayor índice de vertidos al medio ambiente son los aceites minerales y sintéticos.

A continuación se presenta un estudio de viabilidad para la detección de estas sustancias en suelo, así como el efecto de degradación de las mismas en el tiempo. Para el análisis de las muestras contaminadas por aceite (REPSOL ELITE 50501 TDI 5W40) se realizó un seguimiento del estado de las muestras mediante el estudio de la respuesta térmica obtenida a partir de ensayos por termografía de pulso largo. Para ello se realizan medidas a lo largo de un gran periodo de tiempo (7 meses) con el objetivo de estudiar la degradación de las tierras con aceite, a temperatura ambiente, en función del tiempo y la distribución de la respuesta térmica de las muestras a nivel de superficie para distintos niveles de contaminación. Las muestras empleadas en el estudio presentan la siguiente distribución.

Muestras Analizadas

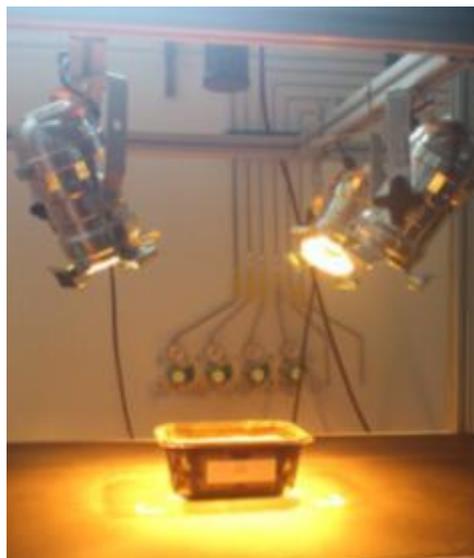
- Muestra 0: 2 muestras. Sustrato únicamente
- Muestra 1: 1 muestra. Aceite con concentraciones medias (1000 mg de aceite/kg de tierra)
- Muestra 2: 2 muestras. Aceite con concentraciones muy elevadas (50.000 mg de aceite/kg de tierra)

Configuración y montaje

Los ensayos para las muestras contaminadas por Aceite se realizaron siguiendo la configuración descrita en el la figura B1, y con la distribución que se muestra en la tabla B1.

Concentración de Aceite en las muestras				
Sustrato		1.000 mg/kg	50.000 mg/kg	
001	002	003	004	005

Tabla B1: Distribución de las muestras para los ensayos



FPS:	600
Numero de imágenes:	6010(10 frías)
Salto de imágenes:	6
Trigger:	0
Altura de la cámara:	0.60 m
Distancia entre flashes.	0.46 m
Angula inclinación flashes:	40°
Distancia a la muestra:	0.50 m

Fig. B1. Configuración de los ensayos mediante termografía de pulso largo para muestras de aceite.

Los ensayos se realizaron empleando la cámara Thermosensorik (ver anexo A), y repitiendo los ensayos cada dos meses aproximadamente para poder establecer un registro de la degradación de la muestra a través de la respuesta térmica obtenida en cada ensayo bajo las mismas condiciones. Tanto para la elaboración de las muestras como en el procedimiento de los ensayos, se siguieron las configuraciones aplicadas a las muestras de plomo presentadas en el Capítulo 5 de este trabajo de tesis (ver apartado 5.3). Para el estudio se realizaron 4 mediciones en un periodo de 7 meses (enero (1), marzo (2), abril (3), julio (4)). En la figura B2 se pueden observar las respuestas térmicas de las muestras de aceite obtenidas en el mes 1, donde se puede comprobar que a mayor concentración de aceite menor es la magnitud de la radiación. Se entiende que el aceite ocupa los espacios ocupados previamente por aire entre los elementos que conforman la tierra de la muestra.

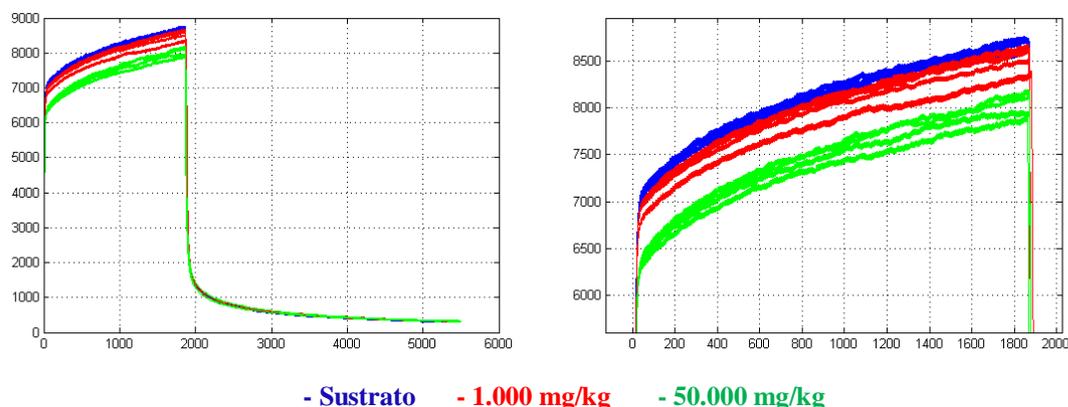


Fig. B2. Distribución de la respuesta térmica de las muestras analizadas. Resultados de los ensayos del 17 de enero.

El aceite, al tener mayor calor específico que el aire, necesita de una mayor cantidad de calor para incrementar su temperatura. Por lo tanto, con la misma cantidad de calor, la temperatura y radiación son menores a medida que se incremente la concentración de aceite. Como se ha estudiado en los casos anteriores (ver Capítulo 5), con el aceite también se puede analizar la respuesta térmica obtenida por termografía de pulso largo mediante el ajuste de su curva. En la figura B3 se pueden observar los 4 coeficientes principales de un ajuste polinómico de grado 6 para el calentamiento (franja de calentamiento de la respuesta térmica de la muestra para termografía de pulso largo). Mediante este análisis se puede comprobar para cualquiera de los cuatro coeficientes que su magnitud es diferente con cada tipo de muestra y además tiene un comportamiento lógico al relacionarlo con la cantidad de contaminante existente en la muestra.

La segunda secuencia de ensayos (marzo) se realizó empleando las mismas muestras con aceite ya ensayadas anteriormente. Como se puede observar en las gráficas de la figura B4, las respuestas térmicas obtenidas en los últimos ensayos presentan una magnitud inferior comparada con las correspondientes a las ensayadas inicialmente.

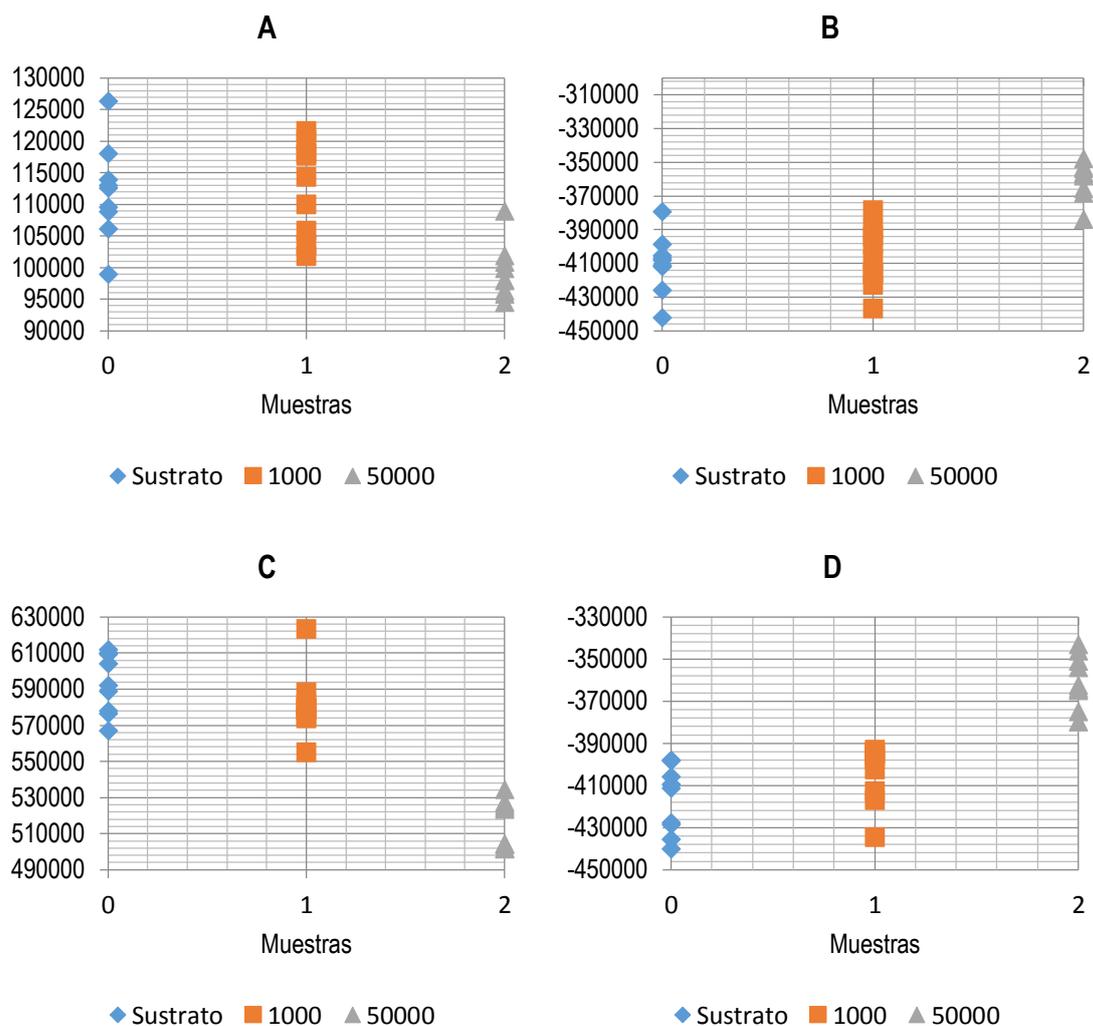


Fig. B3. Resultados ajuste polinómico de grado 6 para el calentamiento.

La evolución de la presencia de aire entre los intersticios, la degradación del aceite y del propio sustrato provocan este efecto. También se observa que en los ensayos realizados en enero existe una mayor variabilidad frente a los ensayos realizados en marzo.

Para estudiar la evolución de la respuesta térmica de las muestras se identifican para las dos primeras fechas (enero, marzo) los valores de radiación correspondientes a dos instantes concretos de la secuencia de imágenes obtenida, en la imagen 600, radiación A, y en la imagen 1800, radiación B (ver figura B5). En la figura B4 se muestra una comparativa de la respuesta térmica de las muestras para las dos primeras secuencias de ensayos, donde se puede comprobar que las mismas se encuentran condicionadas por el nivel de contaminación que presentan, así como por el periodo de tiempo entre ensayos.

En la figura B5, donde se relacionan los dos coeficientes comentados, se puede observar como para la segunda secuencia de ensayos (marzo) se ha producido una disminución de los valores de radiación obtenidos, así como la disminución producida al aumentar la concentración de contaminante.

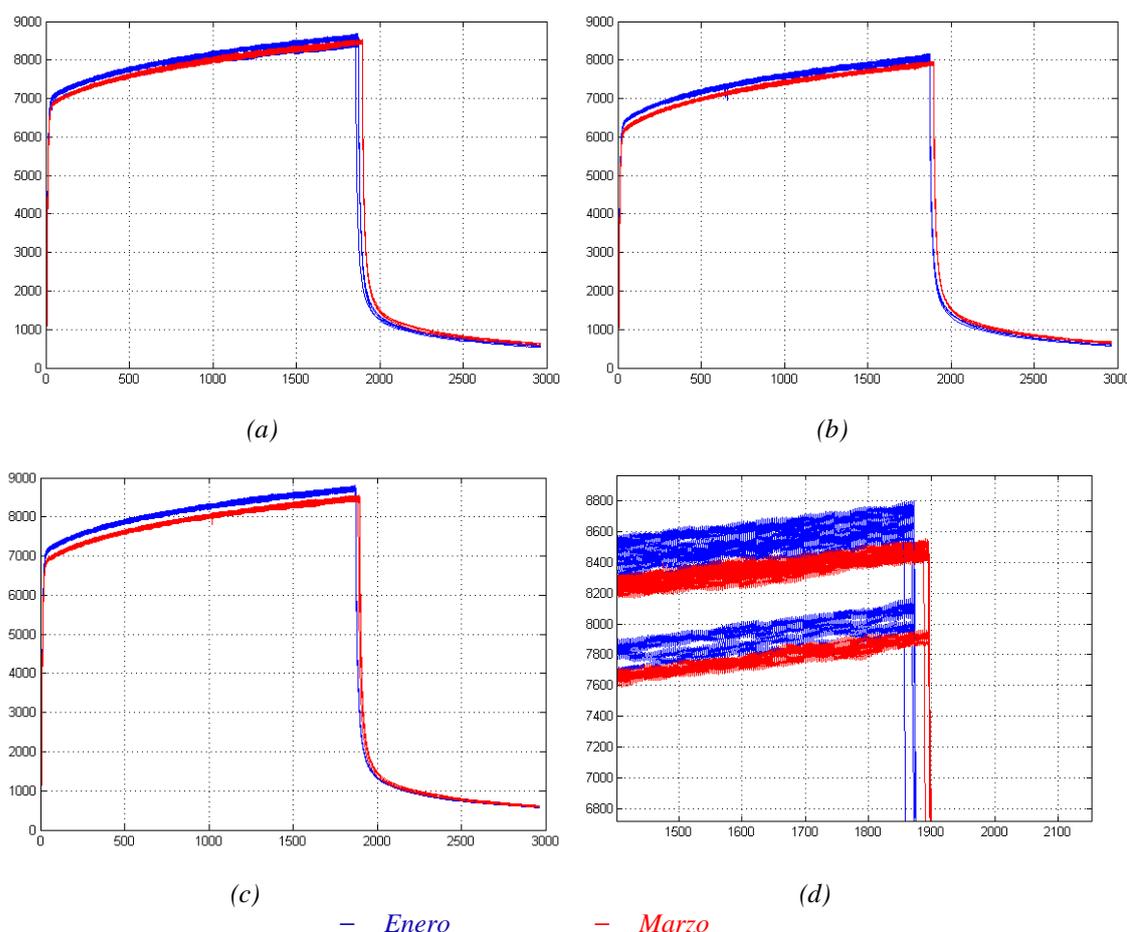


Fig. B4. Comparativa de resultados de los ensayos con un intervalo de dos meses. Sustrato (a), 1.000 mg/kg (b), 50.000 mg/kg (c), todos (d).

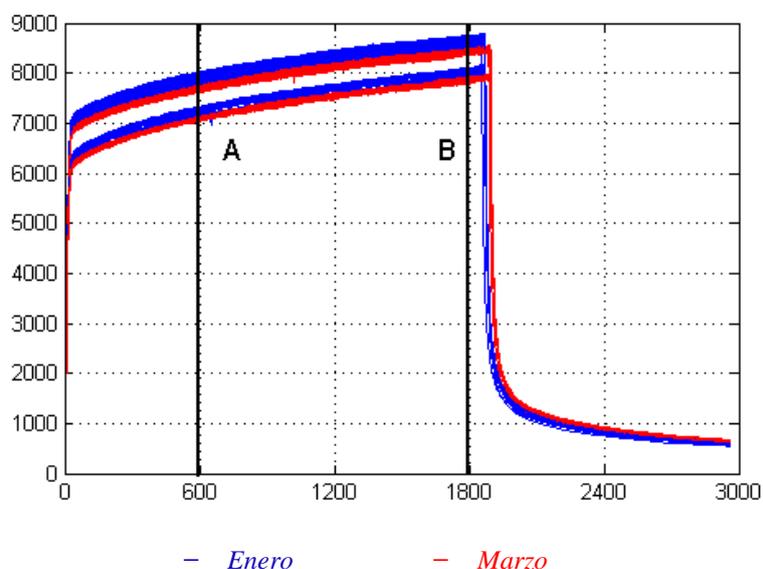


Fig. B5. Valor de radiación correspondiente para los instantes A y B de la respuesta térmica obtenida.

En la figura B6 se muestra la distribución de la respuesta térmica de las muestras en un periodo de 7 meses. A partir de estos resultados se puede comprobar la correspondencia entre el comportamiento de la respuesta térmica de las muestras y la concentración de aceite en las mismas, donde el valor de radiación obtenida es inversamente proporcional al nivel de contaminación de la muestra.

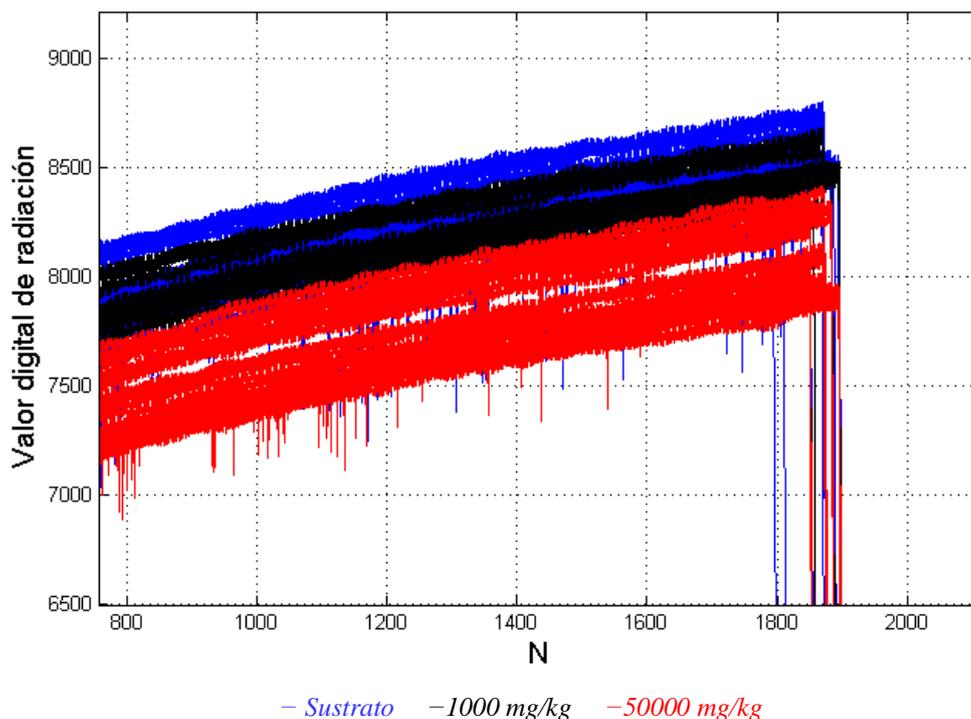


Fig. B6. Respuesta térmica de las muestras para distintos niveles de aceite durante 7 meses.

En la figura B7 se muestra la distribución de los valores A y B para 4 mediciones realizadas en un periodo de 7 meses. Los resultados obtenidos reflejan la degradación de las muestras en el tiempo. La radiación emitida por las muestras ha ido disminuyendo mientras que la diferencia de radiación entre las muestras no ha variado. A partir de los resultados obtenidos se puede estimar un comportamiento lógico progresivo en la degradación de las muestras, mayormente apreciable en las muestras altamente contaminadas, las cuales tienden a ocupar valores más cercanos a las poco o nada contaminadas con el tiempo.

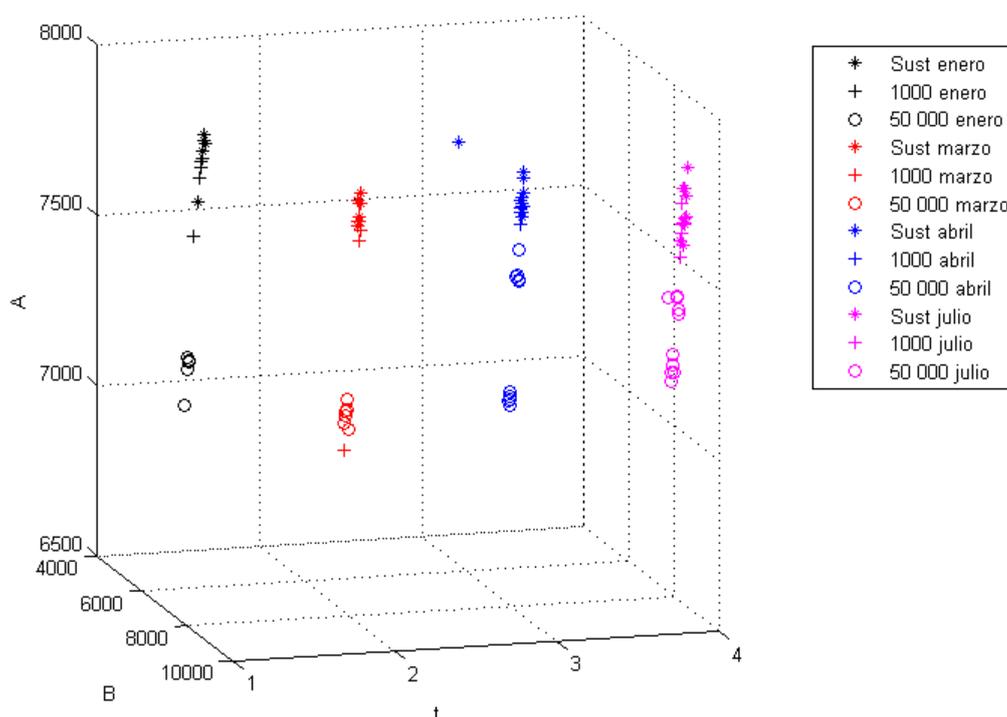


Fig. B7. Comparativa de resultados de los ensayos con un intervalo de dos meses para los puntos A y B.

A partir de los resultados obtenidos en este estudio, se puede comprobar la viabilidad del empleo de técnicas de ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja para la detección e identificación de vertidos de aceite en suelos, así como la posibilidad de estimar a partir de la degradación de las muestras, una fecha aproximada del vertido.

C: Desarrollo de prototipo para la detección de suelos contaminados

C.1. Preámbulo

Como resultado de las contribuciones presentadas en el Capítulo 5 se ha construido el prototipo THERMO-SPC que estudia la respuesta térmica de los suelos contaminados utilizando la termografía infrarroja para determinar su nivel de contaminantes. El prototipo se divide en dos partes, una parte hardware encargada principalmente de la excitación térmica del suelo así como de la captura de dicha respuesta. Y que además ofrece datos complementarios a la medida como condiciones atmosféricas, posicionamiento GPS, etc... Y por otro lado, una parte software que permite controlar la cámara termográfica, capturar la secuencia de termogramas, traducir dicha secuencia en una curva característica de calentamiento, identificar dicha curva, almacenar la respuesta térmica así como otros parámetros, como localización por GPS y datos climatológicos, y determinar la existencia o no de contaminantes.

C.2. Hardware

La figura C1 muestra la disposición y conexionado de los diferentes bloques de los que consta el prototipo THERMO-SPC desarrollado.

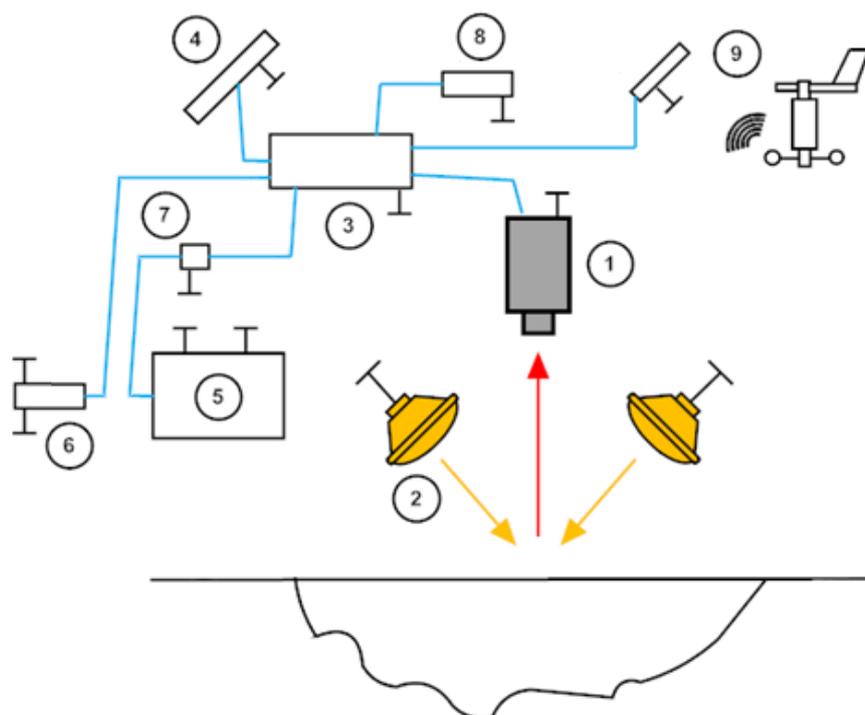


Fig. C1. Esquema de los componentes del equipo.

Los bloques que aparecen en la figura C1 se describen como:

1. Sistema de captura de radiación térmica.
2. Sistema de excitación.
3. CPU central.
4. Pantalla táctil.
5. Batería.
6. Regulador/cargador de batería.
7. Medidor del nivel de carga de la batería.
8. GPS.
9. Estación meteorológica.

D.2.1. Sistema de captura de radiación térmica.

La medida de la respuesta térmica de las tierras muestreadas se realiza mediante un sistema de captura de radiación térmica. Permite captar la radiación emitida por la tierra al ser ésta calentada externamente, según una técnica conocida como termografía activa tipo step-heating (termografía de pulso largo).

El sistema capta valores de radiación de pequeñas áreas cuadradas, tantas como píxeles posea el sensor óptico. El conjunto de las lecturas de dichos píxeles conforman la imagen térmica o termograma. Con el sistema se consigue una secuencia de termogramas que posteriormente será analizada mediante los algoritmos diseñados para detectar contaminantes en función de la respuesta térmica obtenida, e implementados en un software. El prototipo se alimenta directamente desde la batería, o regulador/cargador si es que está conectado, y se conecta a la CPU a través de un cable Ethernet. En la figura C2 se muestran las características del sistema de medida.

Tipo de detector: FPA Microbolómetros sin refrigerar

Resolución: 160x120

Rango espectral: 8-14 μm

Tamaño píxel: 35x35 mm

Píxeles muertos: <1%

Sensibilidad térmica: 0.1 $^{\circ}\text{C}$ @ 30 $^{\circ}\text{C}$

Enfoque: manual



Fig. C2. Cámara termográfica.

C.2.2. Sistema de excitación.

El sistema de excitación externo está compuesto por 6 lámparas que irradian energía hacia un mismo punto situado a 30 cm de distancia, medidos en la vertical respecto a la base de la corona.

Como estructura portante se desarrolla una corona hexagonal con placas de aluminio, colocando una lámpara en cada cara. El sistema permite seleccionar dos sistemas de calentamiento, uno con 3 lámparas y otro con las 6 lámparas que se pueden ver en la figura C3. El sistema de lámparas se activa usando las salidas digitales de la CPU. Estas salidas se conectan a un circuito mediante relé, con fusible de protección para evitar posibles fallos en la alimentación del sistema. Se alimentan directamente desde la batería o regulador/cargador. Los focos utilizados presentan las siguientes características:

Potencia Nominal: 100 W

Tensión: 0-12 V

Apertura del haz de luz: 8°

Diámetro de la parábola metálica: 111 mm

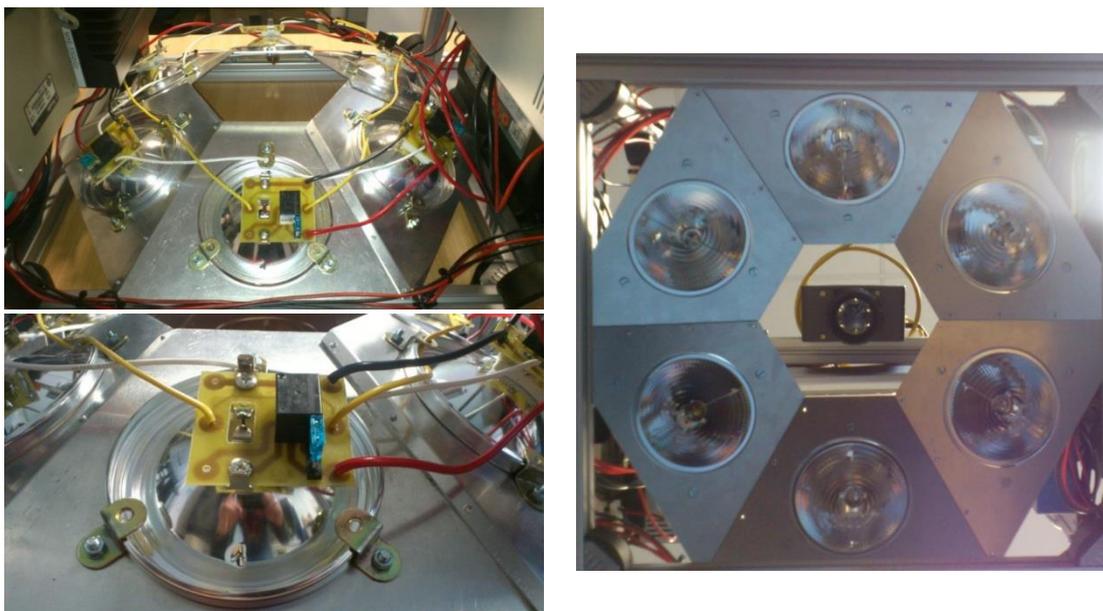


Fig. C3. Lámparas y corona metálica

C.2.3. CPU

Para centralizar todas las operaciones de control, procesar los termogramas, ejecutar los algoritmos de identificación, cargar la interfaz y almacenar la información, se utiliza una unidad CPU. Adicionalmente, se puede conectar un teclado, un ratón e incluso una unidad WiFi USB si se desea tener acceso a internet. La CPU se muestra en la figura C4 y presenta las siguientes características.

Microprocesador Intel® Core™ i5-2510E
 4 Gb RAM
 VGA/DVI
 4 x ethernet Gbit
 4 x USB 2.0
 2 x USB 3.0
 4 DI + 4DO
 2 x RS-232
 2 x RS-232/422/485
 HD SATA 2.5" de 128Gb.
 Power input 9-32VDC



Fig. C4. CPU

C.2.4. Pantalla táctil

Para la visualización se utiliza una pantalla táctil resistente a impactos y agua. Se conecta a la CPU a través de un cable USB y presenta las siguientes características (ver figura C5):

- Display industrial Acrosser panelable mod. AR-DP150
- 15" TFT 1280 x 1024
- Frontal IP-65 de acero inoxidable
- Touchscreen resistiva integrada con control por RS-232
- Alimentación directa de 220 V_{ac}



Fig. C5. Pantalla táctil

C.2.5. Batería

El prototipo puede ser alimentado por batería para su uso en exteriores o por la red eléctrica. Las características de la batería son:

- Tensión: 12 V
- Intensidad: 60 Ah

Además de poder funcionar con una batería, el equipo tiene la opción de poder estar conectado a la red. El regulador/cargador de batería cumple dos funciones, siempre conectado a la red eléctrica, por un lado suministrar electricidad a los elementos del equipo permitiendo su funcionamiento, y por otro cargar la batería si es que ésta se ha descargado. Su aspecto se muestra en la figura C6a).



(a)



(b)

Fig. C6. Regulador/cargador (a) y Medidor del nivel de carga de la batería (b).

Características:

- Tensión de entrada: 90...264V
- Tensión de salida: 14,4V / 13,8V
- Corriente de salida: 20,5A
- Potencia de salida: 300W

El equipo permite detectar el nivel de carga de la batería, creando una llamada de aviso en el interfaz de usuario. Está compuesto por un microcontrolador ARDUINO que se comunica mediante USB a la CPU y mide la tensión de la batería para hacer una estimación de la carga de la misma (ver figura C6b). Se conecta directamente a la batería y a la CPU a través de un cable USB.

C.2.6. GPS

Con el objeto de calcular la localización de los puntos de medida y posteriormente almacenar dicha información, el equipo consta de un GPS, marca TRIMBLE, que se conecta directamente a la CPU mediante un cable USB.



Fig. C7. GPS (a) y antena (b).

C.2.7. Estación meteorológica

Con el objeto de controlar las condiciones meteorológicas y determinar las influencias de las diferentes variables meteorológicas a la hora de realizar las mediciones en campo e interpretar los resultados, el equipo incorpora una estación meteorológica (ver figura C8). Con ella se pueden medir la temperatura, índice de calor, humedad, punto de condensación, velocidad del viento, dirección del viento, sensación térmica, índice UVA, presión barométrica y precipitación diaria y acumulada. Incorpora sensores para captar todos estos datos. Se conecta a la CPU a través de un cable USB.



Fig. C8. Estación meteorológica

C.3. Software

El software THERMO-SPC presenta un manejo rápido, sencillo y efectivo que, además de interpretar las respuestas térmicas e identificarlas con la existencia o no de contaminantes, sirve de interfaz de usuario que aparece en la misma pantalla del equipo.

La radiación térmica que emiten las tierras después de ser excitadas externamente mediante el uso de las lámparas instaladas es captada por la cámara termográfica que traduce la señal a valores, traduciendo esos valores a imágenes termográficas o termogramas. Los termogramas son procesados por algoritmos implementados en el software que permiten interpretar un comportamiento térmico característico determinando la existencia o no de contaminante y si éste es plomo, mercurio, lindano o aceite.

A continuación, se procede a detallar las diferentes opciones y pantalla del interfaz de usuario:

- Ventana principal.
- Ventana de análisis de terreno.
- Ventana de localización GPS.
- Ventana de medidas anteriores.
- Ventana de ajustes.

C.3.1. Ventana principal

La ventana principal tiene un aspecto como se muestra la figura C9, donde se muestran todas las opciones generales, además de visualizar la situación climática actual, en continuo lo captado por el sistema de radiación térmico así como indicadores de carga de batería, posicionamiento del GPS, etc.

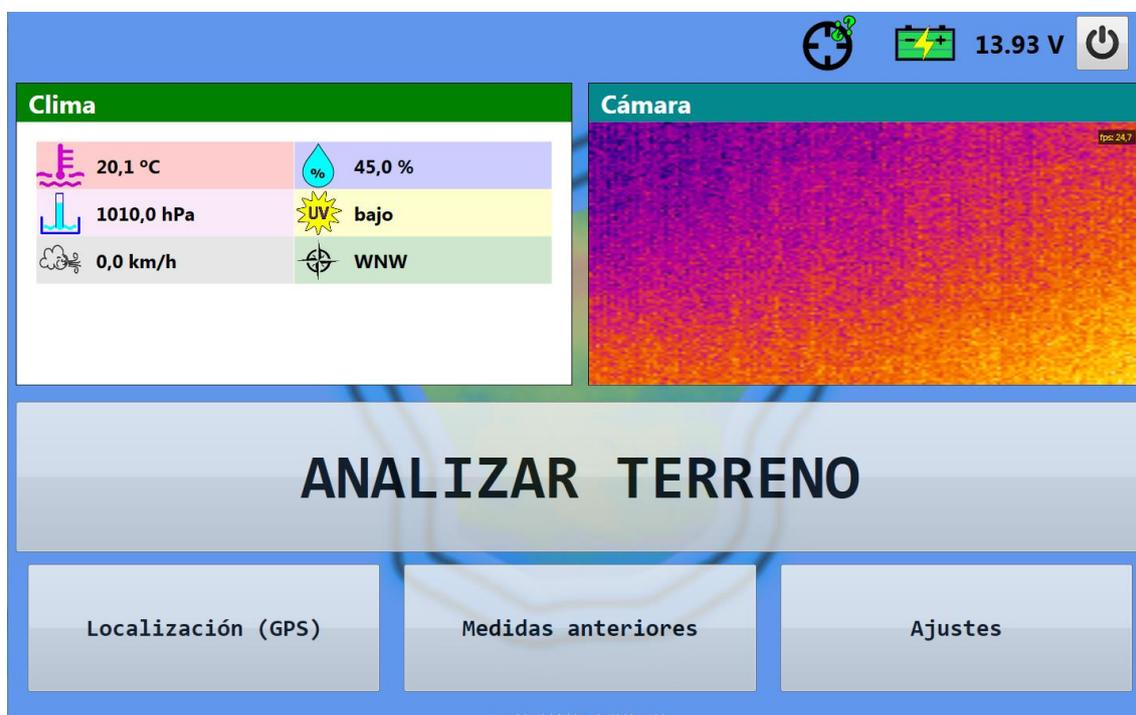


Fig. C9. Pantalla principal de la aplicación.

En la parte superior derecha de la pantalla aparecen 4 iconos de señalización cuyo significado se describe en la tabla C1.

	Disponibilidad del GPS. Los signos de interrogación cambiarán a un OK cuando el GPS esté disponible. Puede tardar unos minutos en conectarse el GPS.
	Indicador de carga de la batería. Se muestran tres niveles de carga (tres rayas verdes, dos rayas naranjas y una raya roja) en función del nivel de carga de la batería. Aparecerá un símbolo amarillo de un rayo cuando el regulador/cargador esté funcionando.
13.93 V	Indicador numérico del nivel de carga de la batería. Se indica el voltaje de la batería pudiendo observar su evolución durante las medidas.
	Apagado. Pinchando sobre el botón la aplicación y el equipo se apagarán.

Tabla C1. Iconos de señalización.

En la ventana correspondiente, parte izquierda de la pantalla, aparecen los datos captados por la estación meteorológica (primera columna: temperatura, presión, velocidad de viento; segunda columna: humedad, radiación solar, dirección del viento), como se muestran en la figura C10.

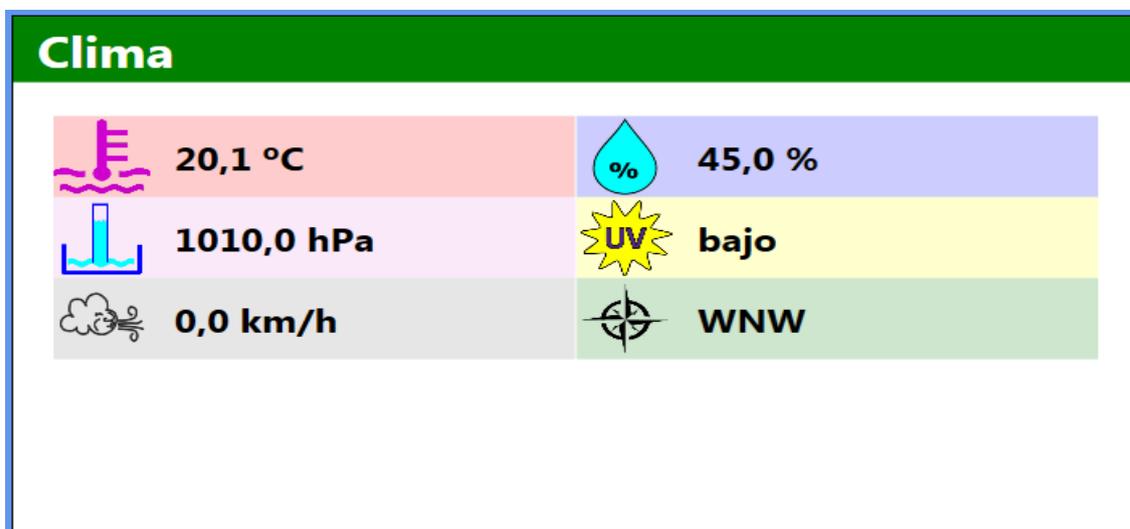


Fig. C10. Valores climatológicos

En la parte superior derecha se muestra un visor donde se puede ver la imagen de radiación térmica captada por el sistema según una paleta de colores denominada Iron (hierro) y que muestran desde el negro hasta el blanco los valores de menos a más que capta el sistema.

También se indica la velocidad de refresco o captura del sistema en imágenes/segundos (frames/segundo fps: termogramas que pueden ser grabados en un segundo). La figura C11 muestra detalle de visor.

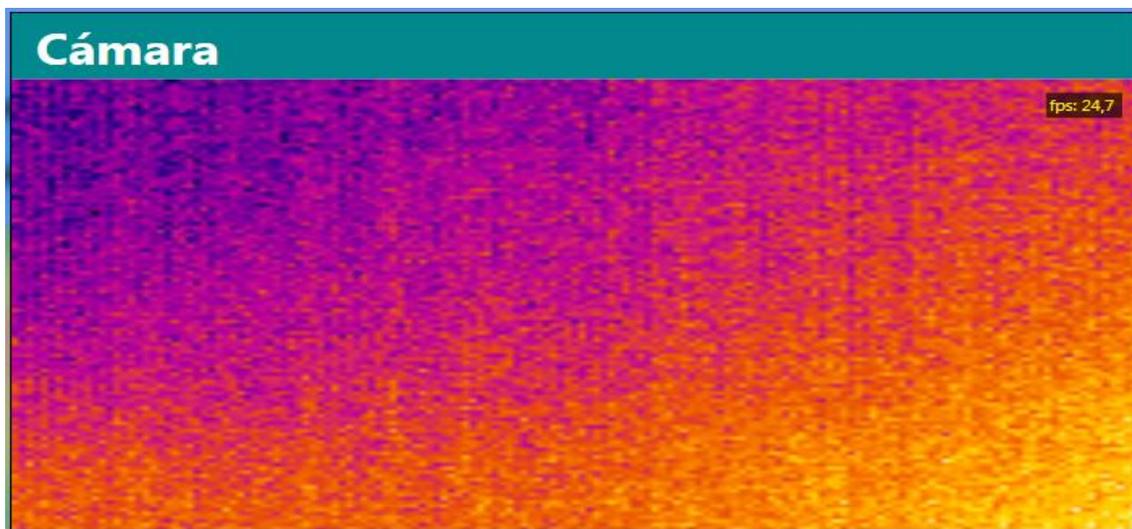


Fig. C11. Vídeo del sistema de captura de radiación.

En la parte inferior se sitúan los botones para acceder al resto de funciones del software.

C.3.2. Ventana de análisis de terreno

Pulsando el botón



se accede a la ventana de análisis. Permite comenzar el proceso de captura de imágenes generando finalmente un resultado, contaminado o no, y en su caso indicando el tipo de contaminante plomo, mercurio, lindano y aceite (si se ha seleccionado la opción de detectar aceites), como se muestra en la figura C12.

Claramente se puede observar si la tierra está contaminada o no, y cuál es el tipo de contaminante. Adicionalmente aparece un gráfica que representa la radiación térmica emitida por la tierra durante el proceso de calentamiento para las fuentes externas utilizadas. En la parte inferior aparece un botón con el que se puede volver a la pantalla anterior.

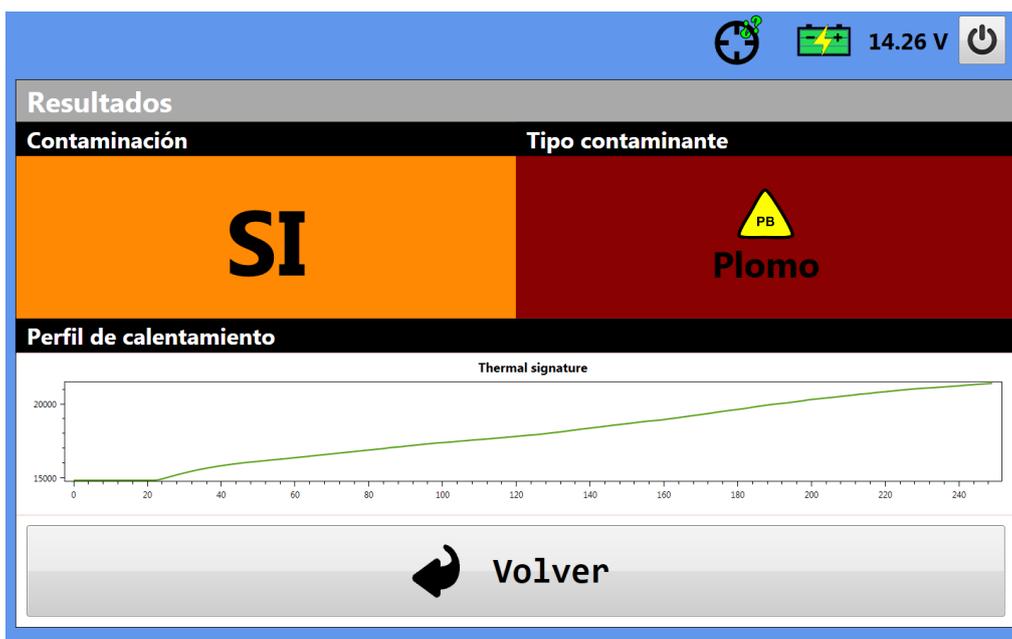


Fig. C12. Ventana de análisis y resultados

C.3.3. Ventana de localización GPS

Si el equipo está conectado a internet al pulsar el botón de localización de GPS se obtiene un mapa de la zona con la posición de las últimas medidas con marcadores indicando si el terreno está o no contaminado. En el caso de no existir acceso a internet o no haberse realizado ninguna medida se mostrará una pantalla en blanco. Al arrancar el equipo se tardarán unos minutos, si es que existe buena señal, en conectarse el GPS y cambiará el icono que se encuentra en la parte superior de la pantalla desde un signo de interrogación a la palabra OK. Una imagen de esta ventana se muestra en la figura C13.



Fig. C13. Señal de GPS.

C.3.4. Ventana de medidas anteriores. Histórico.

Pulsando este botón aparecerá otra ventana indicando las medias realizadas anteriormente con su fecha/hora, si está o no contaminado, tipo de contaminante y latitud/longitud en caso de estar conectado el GPS.



Al pinchar en el botón “Exportar medidas...” se crea un fichero de texto .txt con toda la información de las medidas anteriores, incluidos los datos climatológicos.

Con el botón Volver se retrocede a la pantalla anterior.

 A screenshot of a mobile application interface. At the top, there's a status bar with icons for GPS, battery, and voltage (14.36 V). Below that is a navigation bar with a 'Volver' button and the title 'Medidas anteriores'. The main area contains a table with the following data:

Fecha/Hora	Contaminación	Tipo	Latitud	Longitud
29/05/2013 9:38:17	SI	Pb	?	?
29/05/2013 9:37:08	SI	Pb	?	?
29/05/2013 9:35:56	SI	Pb	?	?
29/05/2013 9:34:41	SI	Pb	?	?
29/05/2013 9:33:33	SI	Pb	?	?
29/05/2013 9:32:20	SI	Pb	?	?
29/05/2013 9:25:37	NO	N/A	?	?
29/05/2013 9:23:09	SI	Pb	?	?
28/05/2013 17:10:54	SI	Pb	?	?
28/05/2013 17:09:42	SI	Pb	?	?
28/05/2013 17:08:33	SI	Pb	?	?
28/05/2013 17:07:14	SI	Pb	?	?
28/05/2013 17:06:00	SI	Pb	?	?
28/05/2013 17:04:38	SI	Pb	?	?
28/05/2013 11:26:03	SI	Pb	?	?
23/05/2013 18:16:28	SI	Pb	?	?
23/05/2013 18:15:39	SI	Pb	?	?
23/05/2013 18:14:52	SI	Pb	?	?

 At the bottom of the table area, there is a button labeled 'Exportar medidas...'.

Fig. C14. Registro de medidas.

C.3.5. Ventana de ajustes. Opciones

Al pinchar sobre el botón de ajustes aparecerá otra ventana en donde se podrá optar por activar o no diversas opciones. Se describen las opciones que aparecen en la figura C15.



Modo de análisis de aceite: Dado que las redes neuronales son diferentes con esta opción se cambia el modo de análisis. Existen dos opciones: Modo Plomo/Mercurio/Lindano y Modo Aceite.

Utilizar versión de laboratorio del algoritmo: Se puede elegir entre el algoritmo completo o una réplica más rápida.

Activar ramal de focos primario: Dado que las lámparas están conectadas en dos grupos de tres, se pueden controlar por separado. Con esta opción se activa o desactiva el primer grupo de 3 lámparas.

Activar ramal de focos secundarios: Con esta opción se activa o desactiva el segundo grupo de 3 lámparas, por lo que el calentamiento se puede realizar con 3 o con 6 lámparas.

Autoescalado de imagen: Permite aplicar un nuevo rango visual para indicar el estado térmico de las muestras ajustando el valor máximo y mínimo de radiación térmica actual de la muestra.

Borrar la base de datos: Permite vaciar la base de datos.

Apagar el sistema cuando la batería está baja: Al detectar un nivel de batería bajo con esta opción se puede decidir si apagar o no el sistema.

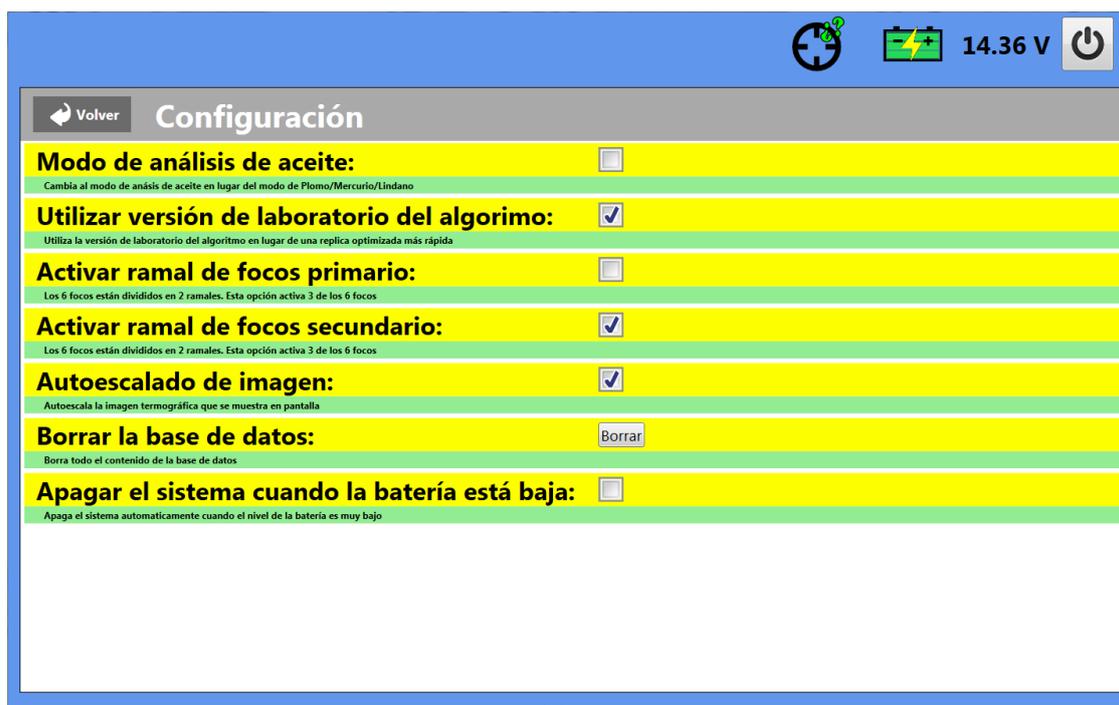


Fig. C15. Opciones.

C.4. Datos de consumo y diagramas

A continuación en la tabla C2 se detallan los datos respectivos al consumo de los equipos y componentes del prototipo.

Ud.	Componente	Pot. Ud.(W)	Potencia (W)
6	Foco	30,00	180,00
1	Ordenador	160,00	160,00
1	Pantalla táctil	30,00	30,00
1	Cámara termográfica	2,90	2,90
1	Modulo GPS	20,00	20,00
1	Estación meteorológica	1,80	1,80
TOTAL			394,70

Tabla C2. Consumo eléctrico del sistema.

A continuación en la figura C16 se muestra la distribución final de los componentes del prototipo, en la figura C17 el esquema eléctrico de conexiones del mismo y en la figura C18 el prototipo Thermo-SPC.

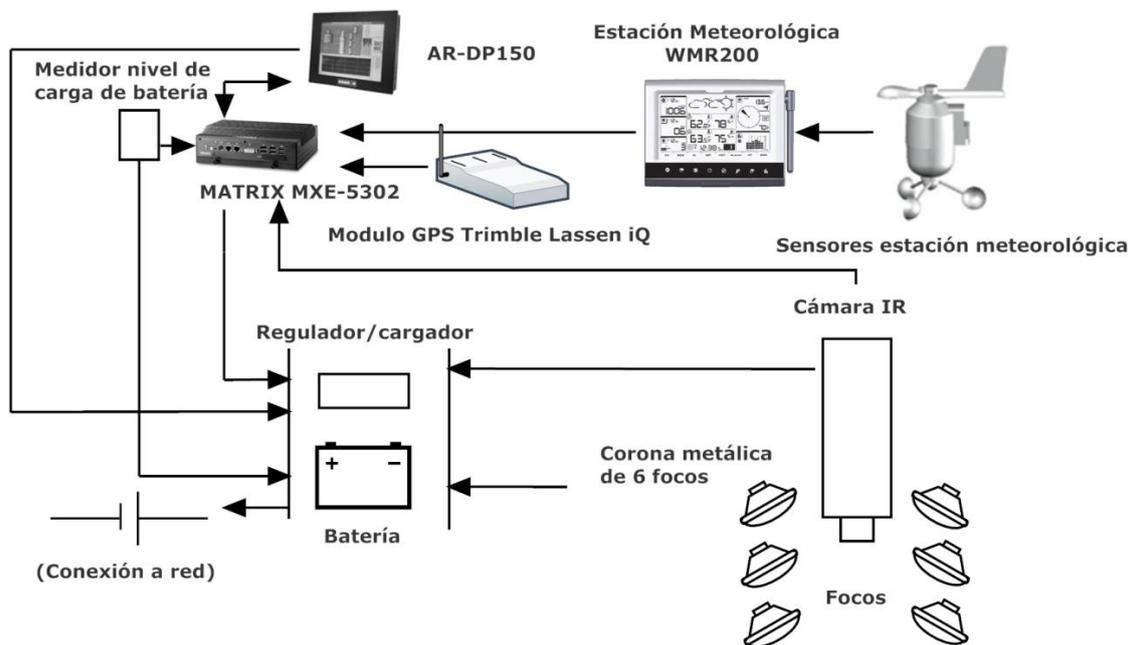


Fig. C16. Diagrama de distribución de componentes.

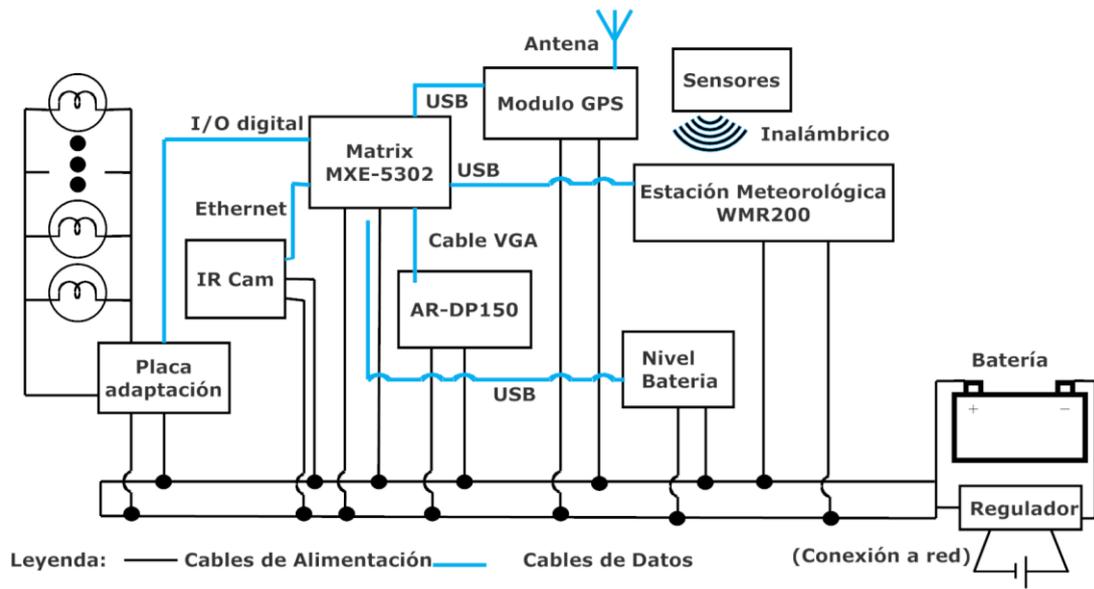


Fig. C17. Esquema de conexiones.



Fig. C18. Prototipo THERMO SPC.

CAPÍTULO 8 BIBLIOGRAFÍA

8.1. Referencias ordenadas numéricamente

1. Rodríguez González, C., *Sistema automatizado de detección de defectos en piezas metálicas mediante ensayos no destructivos con ultrasonidos*. 2012: Universidad de Cantabria.
2. Halmshaw, R., *Introduction to Non-Destructive Testing*. Non-Destructive Testing, 1989: p. 1-72.
3. Van Hemelrijck, D. and A. Anastassopoulos, *Non Destructive Testing*. 1996: CRC Press.
4. Prokhorenko, P., N. Migoun, and M. Stadthaus, *Theoretical principles of liquid penetrant testing*. 1999: DVS-Verlag Berlin.
5. Prasad, J. and C.G.K. Nair, *Non-Destructive Test And Evaluation Of Materials*. 2008: Tata McGraw-Hill.
6. Halmshaw, R., R. Honeycombe, and P. Hancock, *Non-destructive testing*. 1991: E. Arnold.
7. Blitz, J., *Electrical and magnetic methods of non-destructive testing*. Vol. 3. 1997: Springer Science & Business Media.
8. Lovejoy, D., *Magnetic Particle Inspection: A Practical Guide*. David Lovejoy. 1993: Springer Science & Business Media.
9. Shull, P.J., *Nondestructive evaluation: theory, techniques and applications*. Dekker Mechanical Engineering, CRC Press; 1st edition, May 8, 2002.
10. Udpa, S.S. and P.O. Moore, *Electromagnetic testing*. 2004: American Society for Nondestructive Testing.
11. McMaster, R.C., P. McIntire, and M.L. Mester, *Electromagnetic testing: eddy current, flux leakage, and microwave nondestructive testing*. 1986: American Society for Nondestructive Testing.
12. Lord, W. and R. Palanisamyx. *Development of theoretical models for nondestructive testing eddy-current phenomena*. in *Eddy-current Characterization of Materials and Structures: A Symposium*. 1981. ASTM International.
13. Lord, W., *Electromagnetic methods of nondestructive testing*. 1985.
14. Sophian, A., et al., *Electromagnetic and eddy current NDT: a review*. Insight, 2001. **43**(5): p. 302-306.
15. Bossi, R.H., F.A. Iddings, and G.C. Wheeler, *Radiographic testing*. Vol. 4. 2002: Amer Society for Nondestructive.
16. Hellier, C.J., *Handbook of Nondestructive Evaluation*. 3rd Edition McGraw-Hill Professional, New York, 2003.
17. Kazantsev, I.G., et al., *Statistical detection of defects in radiographic images in nondestructive testing*. Signal Processing, 2002. **82**(5): p. 791-801.
18. da Silva, R.R. and D. Mery, *State-of-the-Art of weld seam inspection by radiographic testing: part i–image processing*. Materials Evaluation, 2007. **65**(6): p. 643-647.

19. Chen, C.-h., *Ultrasonic and advanced methods for nondestructive testing and material characterization*. 2007: World Scientific.
20. Filipczyński, L., Z. Pawłowski, and J. Wehr, *Ultrasonic methods of testing materials*. 1966: Butterworths.
21. Kremkau, F.W., *Diagnostic ultrasound: principles and instruments*. 2001: WB Saunders Company.
22. Luna, R.A., A.L.L. Sánchez, and A.A.E. Juárez, *Sistema ultrasónico para inspección automática de componentes industriales por inmersión*.
23. Olympus, N., *Introduction to phased array ultrasonic technology applications*. D Tech Guideline”, Olympus NDT, 2004.
24. Charlesworth, J.P. and J.A.G. Temple, *Engineering applications of ultrasonic time-of-flight diffraction*. 2001: Research Studies Press Ltd.
25. Grosse, C.U. and M. Ohtsu, *Acoustic emission testing*. 2008: Springer Science & Business Media.
26. Miller, R.K. and P. McIntire, *Nondestructive Testing Handbook. Vol. 5: Acoustic Emission Testing*. American Society for Nondestructive Testing, 4153 Arlingate Plaza, Caller# 28518, Columbus, Ohio 43228, USA, 1987. 603, 1987.
27. Closa González, P. and R. Grau Mur, *Las emisiones acústicas y su aplicación al mantenimiento predictivo; Estudio de la aplicabilidad de la teoría de las EA al mantenimiento predictivo*.
28. Lockner, D. *The role of acoustic emission in the study of rock fracture*. in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1993. Elsevier.
29. Dunegan, H., D. Harris, and C. Tatro, *Fracture analysis by use of acoustic emission*. *Engineering Fracture Mechanics*, 1968. **1**(1): p. 105-122.
30. Beattie, A., *Acoustic emission, principles and instrumentation*. *Journal of acoustic emission*, 1983. **2**(12): p. 95-128.
31. Astarita, T., G. Cardone, and G. Carlomagno, *Infrared thermography: An optical method in heat transfer and fluid flow visualisation*. *Optics and lasers in engineering*, 2006. **44**(3): p. 261-281.
32. Carlomagno, G.M. and G. Cardone, *Infrared thermography for convective heat transfer measurements*. *Experiments in fluids*, 2010. **49**(6): p. 1187-1218.
33. R. Hidalgo-Gato, J.R.A., J.M. López-Higuera, F.J. Madruga, *Ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja*. AEND (Asociación española de ensayos no destructivos), 2013. **62**: p. 24-35.
34. Gonzalez, R.C. and R.E. Woods, *Digital imaging processing*. 9e191, 2002: p. 18.
35. Benitez Restrepo, H.D., et al., *Procesamiento de imágenes infrarrojas para la detección de defectos en materiales*. *Revista Tecnura*, 2007. **10**(20): p. 40-51.
36. González, D.A., *Contribuciones a las técnicas no destructivas para evaluación y prueba de procesos y materiales basadas en radiaciones infrarrojas*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones. Universidad de Cantabria, 2006.
37. Zalameda, J.N., N. Rajic, and W.P. Winfree. *A comparison of image processing algorithms for thermal nondestructive evaluation*. in *AeroSense 2003*. 2003. International Society for Optics and Photonics.
38. Madruga, F.J., et al., *Infrared thermography processing based on higher-order statistics*. *NDT & E International*, 2010. **43**(8): p. 661-666.
39. Madruga, F.J., et al. *Enhanced contrast detection of subsurface defects by pulsed infrared thermography based on the fourth order statistic moment, kurtosis*. in

- SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2009. International Society for Optics and Photonics.
40. Jaeger, J.C. and H.S. Carslaw, *Conduction of heat in solids*. 1988: Clarendon.
 41. Holst, G.C., *Common sense approach to thermal imaging*. 2000: SPIE Optical Engineering Press Washington, DC, USA:.
 42. Maldague, X., *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. 2001.
 43. Mihai, A., et al., *Composite Materials Flaws Detection and Measurement by Infrared Thermography*.
 44. Choi, M., et al., *Defects Detection in GFRP Composites by using Transmission method of Infrared Thermography*.
 45. Park, H.S., et al., *Study on the Qualitative Defects Detection in Composites by Optical Infrared Thermography*. 2011.
 46. Zhao, L. and W. Guo, *Inspection of Pseudo Kissing-bond Defects in Composite Laminate with Infrared Sensing*.
 47. Avdelidis, N.P. and X. Maldague, *NDT characterisation of carbon-fibre and glass-fibre composites using non-invasive imaging techniques*. Proc. of QIRT, 2010.
 48. Ullmann, T., R. Aoki, and T. Schmidt. *Lock-in thermography for process integrated non-destructive evaluation of carbon fibre reinforced aircraft structures*. in *Proceedings of 10th Quantitative InfraRed Thermography conference, paper QIRT2010-140, Québec (Canada)*. 2010.
 49. Mulaveesala, R., et al. *Pulse compression approach to digitized frequency modulated infrared imaging for non-destructive testing of carbon fibre reinforced polymers*. in *SPIE Sensing Technology+ Applications*. 2014. International Society for Optics and Photonics.
 50. Shin, P., S. Webb, and K. Peters. *Nondestructive inspection in adhesive-bonded joint CFRP using pulsed phase thermography*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2013. International Society for Optics and Photonics.
 51. Ibarra-Castanedo, C., et al. *Nondestructive testing of externally reinforced structures for seismic retrofitting using flax fiber reinforced polymer (FFRP) composites*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2013. International Society for Optics and Photonics.
 52. Mulaveesala, R., et al. *Nondestructive testing and evaluation of composites by non-invasive IR Imaging techniques*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2013. International Society for Optics and Photonics.
 53. Theodorakeas, P., et al. *Automated transient thermography for the inspection of CFRP structures: experimental results and developed procedures*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2011. International Society for Optics and Photonics.
 54. Ibarra-Castanedo, C., et al. *Active thermography signal processing techniques for defect detection and characterization on composite materials*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2010. International Society for Optics and Photonics.
 55. Chuah, T.K., et al., *Active infrared sensing of impact damage in carbon fibre reinforced polymer*.
 56. Vavilov, V., A. Chulkov, and D. Derusova. *IR thermographic characterization of low energy impact damage in carbon/carbon composite by applying optical and ultrasonic stimulation*. in *SPIE Sensing Technology+ Applications*. 2014. International Society for Optics and Photonics.

57. Meola, C. and G.M. Carlomagno, *Impact damage in GFRP: new insights with infrared thermography*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010. **41**(12): p. 1839-1847.
58. Ibarra-Castanedo, C., et al., *Detection and characterization of water ingress in honeycomb structures by passive and active infrared thermography using a high resolution camera*.
59. Guo, X. and F. Zhang. *Study on pulsed thermography to detect water ingress in composite honeycomb panels*. in *11th International Conference on Quantitative Infrared Thermography*. 2012.
60. Ibarra-Castanedo, C., et al. *Water ingress detection in honeycomb sandwich panels by passive infrared thermography using a high-resolution thermal imaging camera*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2012. International Society for Optics and Photonics.
61. Bougeard, D., S. Russeil, and N. François, *Determination of local heat transfer coefficient distribution on a vortex enhanced finned-tube heat exchanger fin using infrared thermography*.
62. Werschnik, H., et al., *Infrared Thermography to Study Endwall Cooling and Heat Transfer in Turbine Stator Vane Passages Using the Auxiliary Wall Method*.
63. Schrijer, F., *Investigation of Görtler vortices in a hypersonic double compression ramp flow by means of infrared thermography*. Quantitative Infrared Thermography Journal, 2010. **7**(2): p. 201-215.
64. Ming, L., Z. Zhi-wei, and L. ZHI-hui, *Key Technical Study of Infrared Thermography on Aerodynamic Heating Measurement in Hypersonic Wind Tunnel*.
65. Zalameda, J.N., et al. *Thermographic imaging of the space shuttle during re-entry using a near-infrared sensor*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2012. International Society for Optics and Photonics.
66. Spisz, T.S., et al. *Processing ground-based near-infrared imagery of space shuttle re-entries*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2012. International Society for Optics and Photonics.
67. Harley, J.L., et al. *Spatially resolved infrared spectra of F109 turbofan exhaust*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2012. International Society for Optics and Photonics.
68. Golzke, H., P. Leick, and A. Dreizler, *Differential Infrared Thermography of Gasoline Direct Injection Sprays*.
69. Toro, C., L. Arias, and S. Torres, *Characterization of a combustion process by measurements of the spatial IR radiation of the flame*.
70. Allouis, C., R. Pagliara, and A. Saponaro, *Fast infrared imaging for combustion stability analysis of industrial burners*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012. **43**: p. 2-8.
71. Fan, J., et al. *Rapid measurement of fatigue behavior of welded joints using the lock-in infrared thermography*. in *11th International conference on quantitative infrared thermography*. 2012.
72. Galietti, U., et al. *Fatigue limit evaluation of martensitic steels with thermal methods*. in *The 12th International Conference of Quantitative Infrared Thermography, QIRT, Bordeaux*. 2014.
73. Žďárský, M., J. Valach, and D. Kytýř, *Evaluation of material's state during deformation process by means of thermographic measurement*.
74. Plekhov, O., et al., *Study of strain localization and energy dissipation in metals based on infrared thermography*.

75. Risitano, A. and G. Risitano, *Cumulative damage evaluation of steel using infrared thermography*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2010. **54**(2): p. 82-90.
76. Fan, J., X. Guo, and C. Wu, *A new application of the infrared thermography for fatigue evaluation and damage assessment*. International Journal of Fatigue, 2012. **44**: p. 1-7.
77. Hongxia, Z., et al., *Prediction of AZ31B Magnesium Alloy Fatigue Life Based on Infrared Thermography*. Rare Metal Materials and Engineering, 2014. **43**(10): p. 2525-2529.
78. Youcef, M.L., et al. *In situ quantitative diagnosis of insulated building walls using passive infrared thermography*. in *Proceedings of the 11th international conference on quantitative infrared thermography*. Naples Italy. 2012.
79. Kauppinen, T. and S. Siikanen. *Building thermography and energy performance directive of buildings*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2012. International Society for Optics and Photonics.
80. Laranjeira, J., et al., *Passive thermography evaluation of bonding defects in adhered ceramic tiling: experimental and in-situ assessments*.
81. Feng, L.Q., et al., *Experimental Study of Infrared Thermography for Detecting Internal Defect of Mortar Finishing Layer*. Applied Mechanics and Materials, 2013. **351**: p. 1312-1317.
82. Kurita, K., et al., *Active infrared thermographic inspection technique for elevated concrete structures using remote heating system*. Infrared Physics & Technology, 2009. **52**(5): p. 208-213.
83. Scott, M., et al. *Passive infrared thermography as a diagnostic tool in civil engineering structural material health monitoring*. in *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III - Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2012*. 2012.
84. Larbi Youcef, M., et al. *Diagnostic of insulated building walls of old restored constructions using active infrared thermography*. in *10 th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, Québec, Canada*. [Links]. 2010.
85. Grinzato, E., et al. *High resolution and automatic survey of buildings by IR thermography*. in *10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Quebec, July*. 2010.
86. Bison, P., et al. *Thermographic analysis of the thermal properties of wood for wooden windows*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2013. International Society for Optics and Photonics.
87. Stockton, G.R. *The case for using a sacrificial layer of absorbent insulation in the design of flat and low-sloped roofing*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2013. International Society for Optics and Photonics.
88. Kleinfeld, J.M. *An evaluation of the impact of an example of thermal bridging in buildings and a design alternative*. 2012.
89. Bison, P. and E. Grinzato. *IR thermography applied to the assessment of thermal conductivity of building materials*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2010. International Society for Optics and Photonics.
90. Albatici, R. and A.M. Tonelli, *Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site*. Energy and Buildings, 2010. **42**(11): p. 2177-2183.

91. Fokaides, P.A. and S.A. Kalogirou, *Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes*. Applied Energy, 2011. **88**(12): p. 4358-4365.
92. Zalewski, L., et al., *Experimental and numerical characterization of thermal bridges in prefabricated building walls*. Energy Conversion and Management, 2010. **51**(12): p. 2869-2877.
93. Asdrubali, F., G. Baldinelli, and F. Bianchi, *A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings*. Applied Energy, 2012. **97**(0): p. 365-373.
94. Bianchi, F., G. Baldinelli, and F. Asdrubali. *A quantitative infrared thermography method for the assessment of windows thermal transmittance*. in *Proceedings of the 10th International Conference on Applied and Theoretical Mechanics (MECHANICS'14)*. 2014.
95. Grinzato, E., et al. *R-value estimation by local thermographic analysis*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2010. International Society for Optics and Photonics.
96. Sakagami, T. and S. Kubo. *Determination of delamination depth in concrete structure based on inverse analysis of thermography data*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2010. International Society for Optics and Photonics.
97. Simões, N., et al., *Active thermography evaluation of bonding defects in adhered ceramic tiling: thermal stimulation conditions and data analysis methods assessment*.
98. Cannard, H., et al., *The use of infrared thermography for defects detection on reinforced concrete bridges*.
99. Brachelet, F., et al. *Detection of reinforcement bars in concrete slabs by infrared thermography and microwaves excitation*. in *The 12th International Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT 2014)*.
100. Dumoulin, J., et al., *Evaluation of FRP gluing on concrete structures by active infrared thermography*. QIRT'10}, 2010: p. 155-163.
101. Krankenhagen, R., G. Kervalishvili, and C. Maierhofer. *Influence of air-gaps on the thermal behaviour of the plaster-concrete bond*. in *Proc. of QIRT 2010 Conference*. 2010.
102. Nahant, M., S. Paez, and J. Van Leeuwen. *Detection by infrared thermography of the heat signature of diseases and defects in concrete structures of civil engineering*. in *Qirt10, 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. 2010.
103. Kujawinska, M., M. Bukalska, and G. Dymny, *Hybrid Digital Image Correlation/Thermovision system for monitoring of civil engineering structures*. Proc. 10th Int. Conference on Quantitative InfraRed Thermography QIRT10, 2010: p. 173-178.
104. Borchardt, T.B., et al., *Breast thermography from an image processing viewpoint: A survey*. Signal Processing, 2013. **93**(10): p. 2785-2803.
105. Qi, H. and N. Diakides, *Thermal Infrared Imaging in Early Breast Cancer Detection*, in *Augmented Vision Perception in Infrared*, R. Hammoud, Editor. 2009, Springer London. p. 139-152.
106. Milosevic, M., D. Jankovic, and A. Peulic, *Thermography based breast cancer detection using texture features and minimum variance quantization*.
107. Wakankar, A., G. Suresh, and A. Ghugare. *Automatic Diagnosis of Breast Abnormality Using Digital IR Camera*. in *Electronic Systems, Signal Processing and Computing Technologies (ICESC), 2014 International Conference on*. 2014. IEEE.

108. Chacon-Murguía, M.I., A.J. Villalobos-Montiel, and J.D. Calderon-Contreras, *Thermal Image Processing for Breast Symmetry Detection Oriented to Automatic Breast Cancer Analysis*, in *Pattern Recognition*. 2014, Springer. p. 271-280.
109. Bhowmik, A., R. Repaka, and S.C. Mishra, *Thermographic evaluation of early melanoma within the vascularized skin using combined non-Newtonian blood flow and bioheat models*. *Computers in biology and medicine*, 2014. **53**: p. 206-219.
110. Bonmarin, M. and F.-A. Le Gal, *Lock-in thermal imaging for the early-stage detection of cutaneous melanoma: A feasibility study*. *Computers in biology and medicine*, 2014. **47**: p. 36-43.
111. Shada, A.L., et al., *Infrared thermography of cutaneous melanoma metastases*. *Journal of surgical research*, 2013. **182**(1): p. e9-e14.
112. Herman, C., *The role of dynamic infrared imaging in melanoma diagnosis*. 2013.
113. Çetingül, M.P. and C. Herman, *Quantification of the thermal signature of a melanoma lesion*. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011. **50**(4): p. 421-431.
114. González, F., et al., *Thermal signature of melanoma and non-melanoma skin cancers*.
115. Berry, B. *A combined approach for using thermography for the detection of diabetes mellitus*. in *SPIE Sensing Technology+ Applications*. 2014. International Society for Optics and Photonics.
116. Balbinot, L.F., et al., *Repeatability of infrared plantar thermography in diabetes patients: a pilot study*. *Journal of diabetes science and technology*, 2013. **7**(5): p. 1130-1137.
117. Mori, T., et al., *Morphological pattern classification system for plantar thermography of patients with diabetes*. *Journal of diabetes science and technology*, 2013. **7**(5): p. 1102-1112.
118. Sivanandam, S., et al., *Medical thermography: a diagnostic approach for type 2 diabetes based on non-contact infrared thermal imaging*. *Endocrine*, 2012. **42**(2): p. 343-351.
119. Chang, K., et al., *Rapid vs. Delayed Infrared Responses after Ischemia Reveal Recruitment of Different Vascular Beds*.
120. Vainer, B. and V. Morozov, *Infrared thermography-based integrated approach aimed at objective evaluation of systemic vascular reactivity in humans*.
121. Sagaidachnyi, A., et al. *Restoration of finger blood flow oscillations by means of thermal imaging*. in *E-book Proceedings of 11-th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. 2012.
122. Liu, W.-M., et al., *Reconstruction of thermographic signals to map perforator vessels in humans*. *Quantitative infrared thermography journal*, 2012. **9**(2): p. 123-133.
123. Van De Groenendaal, H., *Thermal-imaging-and-its-applications*. EngineerIT, 2011.
124. Ring, E. and K. Ammer, *Infrared thermal imaging in medicine*. *Physiological measurement*, 2012. **33**(3): p. R33.
125. Pascoe, D., et al. *International standards for pandemic screening using infrared thermography*. in *SPIE Medical Imaging*. 2010. International Society for Optics and Photonics.
126. Bagavathiappan, S., et al., *Infrared thermography for condition monitoring—a review*. *Infrared Physics & Technology*, 2013. **60**: p. 35-55.

127. Andonova, A., *Preventive diagnostics of Instrumentation and Automation by thermographic measurements.*
128. Huda, A.N. and S. Taib, *Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment.* Applied Thermal Engineering, 2013. **61**(2): p. 220-227.
129. Shpartko, P., et al., *Thermography in manufacturing: nondestructive evaluation of ultrasonic spot welds of automotive battery pack.* 11th Quantitative InfraRed Thermography. Naples, Italy, 2012.
130. dit Leksir, Y.L., S. Bouhouche, and M. Bouchrit, *Automatic Diagnosis of Iron and steel Equipment using Infrared Thermography.*
131. da Costa Bortoni, E., et al., *Losses estimation in induction motors using infrared thermography techniques.*
132. da Costa Bortoni, E. and R.T. Siniscalchi. *Thermographic evaluation of hydrogenerator losses.* in *SPIE Defense, Security, and Sensing.* 2012. International Society for Optics and Photonics.
133. Pezzani, F. and A. Salerno, *Thermoelastic investigation of a servo-actuated hydraulic plastic valve undergoing a time dependant internal pressure variation.*
134. Tavakoli, S., I. RANC, and D. WAGNER, *Thermal behavior study of the mold surface in HPDC process by infrared thermography and comparison with simulation.*
135. Kastek, M., et al. *Thermographics measurements and numerical simulation of a car brakes.* in *11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography.* 2012.
136. Kowal, L., K. Turewicz, and T. Kruczek, *Measurements of temperature of brake disks in hoisting machines of mine shaft hoists.*
137. Cuccurullo, G., V. Spingi, and R. Di Giuda. *Thermal effects in dry sliding contacts.* in *11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography.*
138. Naranjo, E. and S.B.P. Bernascolle. *IR gas imaging in an industrial setting.* in *Proc. SPIE.* 2010.
139. Wurzbach, R.N., E.W. Bupp, and L.A. Williams. *Monitoring and thermal effects of relubrication of greased bearings.* in *SPIE Defense, Security, and Sensing.* 2012. International Society for Optics and Photonics.
140. Viviès, N., et al., *Characterization of an integrated buck converter using infrared thermography.* 2014.
141. Chinakhov, D., *Influence of gas shielding conditions upon the thermal processes in weld joints when welding with a consumable electrode.*
142. Tonković, Z., et al., *Numerical and Experimental Modeling of a T-joint Fillet Welding Process.* TC, 2012. **250**: p. 500.
143. Linares, R., et al. *Monitoring of industrial welding processes using high-speed uncooled MWIR imaging sensors.* in *SPIE Sensing Technology+ Applications.* 2014. International Society for Optics and Photonics.
144. Broberg, P., *Surface crack detection in welds using thermography.* NDT & E International, 2013. **57**: p. 69-73.
145. Frappier, R., et al., *Quantitative infrared analysis of welding processes: temperature measurement during RSW and CMT-MIG welding.* Science and Technology of Welding and Joining, 2014. **19**(1): p. 38-43.
146. Dorsch, F., et al. *Online NIR diagnostic of laser welding processes and its potential for quality assuring sensor systems.* in *SPIE LASE.* 2014. International Society for Optics and Photonics.

147. Pregowski, P., et al. *Opportunities and challenges of the application of dynamic, multispectral thermography as a means of improving the effectiveness of furnace processes in the petrochemical industry*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2012. International Society for Optics and Photonics.
148. Vahid, P.H., et al., *A Defect Detection Approach in Thermal Images*.
149. Bison, P., et al. *Evaluation of frescoes detachments by partial least square thermography*. 2014. QIRT.
150. Restrepo, A. and H. Loaiza, *New method for basic detection and characterization of flaws in composite slabs through Finite Difference Thermal Contrast (FDTC)*. *J. Nondestr. Test. Ultrason*, 2012. **17**(10).
151. López, F., et al. *Comparative study of thermographic signal reconstruction and partial least squares thermography for the detection and evaluation of subsurface defects*. in *12th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, Bordeaux, France*. 2014.
152. Larsen, C.A., *Document flash thermography*. 2011.
153. Mailliet, D., *Thermal quadrupoles: solving the heat equation through integral transforms*. 2000: John Wiley & Sons Inc.
154. Benítez, H.D., et al., *Definition of a new thermal contrast and pulse correction for defect quantification in pulsed thermography*. *Infrared Physics & Technology*, 2008. **51**(3): p. 160-167.
155. Ibarra-Castanedo, C., et al. *Review of thermal-contrast-based signal processing techniques for the nondestructive testing and evaluation of materials by infrared thermography*. in *Proc. Int. Workshop on Imaging NDE (Kalpakkam, India, 25–28 April 2007)*. 2007.
156. Restrepo-Girón, A.D., A.D. Restrepo-Girón, and H.L.-C. Humberto Loaiza-Correa, *3D discrete model for thermal contrast enhancement and defects depth estimation in CFRP slabs*. *Revista Ingeniería y Competitividad*, 2014. **16**(2): p. 143-153.
157. Restrepo-Girón, A.D., *Contribución a la Solución del Problema de Detección y Caracterización de Defectos en Termografía Activa mediante Procesamiento Espacio - Temporal de Secuencias de Imágenes Infrarrojas*, in *Grupo de Investigación en Percepción y Sistemas Inteligentes*. 2014, Universidad del Valle
158. Lopez, F., et al., *Optimization of pulsed thermography inspection by partial least-squares regression*. *NDT & E International*, 2014. **66**: p. 128-138.
159. López, F., et al., *Multivariate Infrared Signal Processing by Partial Least-Squares Thermography*. Québec, Canada, 2013.
160. Olbrycht, R. and B. Wiecek, *New approach to thermal drift correction and gain determination in microbolometer thermal cameras*.
161. Polakowski, H., et al., *Gradient-emissivity thermal emitter for IR camera testing and calibration*.
162. Lagüela, S., et al., *Calibration and verification of thermographic cameras for geometric measurements*. *Infrared Physics & Technology*, 2011. **54**(2): p. 92-99.
163. Luhmann, T., J. Piechel, and T. Roelfs, *Geometric calibration of thermographic cameras*, in *Thermal Infrared Remote Sensing*. 2013, Springer. p. 27-42.
164. Bendada, A., et al., *Active thermography data processing for the NDT&E of frescoes*. *QIRT 2010*, 2010: p. 27-30.
165. Candoré, J.C., et al. *Approach of the measurement of thermal diffusivity of mural paintings by front face photothermal radiometry*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2010. IOP Publishing.

166. Gavrilov, D., et al., *A comparison of near-and mid-infrared band reflectography in the diagnostics of artwork*. 2010.
167. Distefano, G. and F. Freni, *Dynamic thermograms processing for the optimization and the automation of hydrocarbons pollution on sea surface detection*.
168. Tank, V., H. Pfanz, and H. Kick, *New remote sensing techniques for the detection and quantification of earth surface CO₂ degassing*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008. **177**(2): p. 515-524.
169. Krapez, J., et al., *Combined airborne thermography and visible-to-near infrared reflectance measurement for soil moisture mapping*.
170. Sansivero, F., et al. *Campi Flegrei volcanic surveillance by thermal IR continuous monitoring*. in *11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. 2012. Department of Aerospace Engineering University of Naples Federico II.
171. Wang, X., et al., *Automated canopy temperature estimation via infrared thermography: a first step towards automated plant water stress monitoring*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010. **73**(1): p. 74-83.
172. Wang, M., et al., *Thermographic visualization of leaf response in cucumber plants infected with the soil-borne pathogen Fusarium oxysporum f. sp. cucumerinum*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012. **61**: p. 153-161.
173. Fidali, M. and W. Jamrozik, *Diagnostic method of welding process based on fused infrared and vision images*. *Infrared Physics & Technology*, 2013. **61**: p. 241-253.
174. Albendea, P., et al. *Signal to noise ratio (SNR) comparison for pulsed thermographic data processing methods applied to welding defect detection*. in *X International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. 2010.
175. Huang, R.-S., L.-M. Liu, and G. Song, *Infrared temperature measurement and interference analysis of magnesium alloys in hybrid laser-TIG welding process*. *Materials Science and Engineering: A*, 2007. **447**(1): p. 239-243.
176. Banerjee, P., S. Govardhan, and B. Chin. *Infrared sensing for on-line weld process monitoring and control*. in *1993 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics*. 1993.
177. Kottilingam, S.C., H.C. Wickle Iii, and B.A. Chin. *Real-Time Monitoring and Control of Weld Penetration for Submerged Arc Welding Process*. in *ASM Proceedings of the International Conference: Trends in Welding Research*. 1998.
178. Al-Karawi, J. and J. Schmidt. *Application of Infrared Thermography to the analysis of Welding processes*. in *7th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, Belgium*. 2004.
179. Assler, H. and J. Telgkamp, *Design of aircraft structures under special consideration of NDT*. 9th ECNDT, September, 2006: p. 25-29.
180. Cho, J., et al. *Thermosonic inspection of a welded SUS plate*. in *2006 SICE-ICASE International Joint Conference, October 18, 2006 - October 21, 2006*. 2006. Busan, Korea, Republic of: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society.
181. Nino, G.F., et al., *Thermal NDI of resistance welded composite structures*. *Composites Part B: Engineering*, 2009. **40**(3): p. 237-248.
182. Wickle, H., et al., *Infrared sensing techniques for penetration depth control of the submerged arc welding process*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001. **113**(1): p. 228-233.
183. Negi, V. and S. Chattopadhyaya, *Critical Assessment of Temperature Distribution in Submerged Arc Welding Process*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013. **2013**.

184. Ravala, N.K., et al. *Modeling and sensing for penetration control of the saw process in the presence of welding perturbations*. in *ASME 2004 Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference*. 2004. American Society of Mechanical Engineers.
185. Cobo, A., et al. *Arc-welding process control based on back face thermography: application to the manufacturing of nuclear steam generators*. in *Defense and Security Symposium*. 2007. International Society for Optics and Photonics.
186. Meola, C., et al., *The use of infrared thermography for nondestructive evaluation of joints*. *Infrared Physics and Technology*, 2004. **46**(1-2 SPEC. ISS.): p. 93-99.
187. Siemer, U. and A. Volkswagen, *Simulation and evaluation of new thermographic techniques for the deployment in the automotive industry*. European Federation for Non-Destructive Testing, ECNDT, 2006.
188. Meola, C., et al., *Analysis of stainless steel welded joints: A comparison between destructive and non-destructive techniques*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004. **155-156**(1-3): p. 1893-1899.
189. Ortega, A.R., et al. *Analysis of buckling distortion in bead-on-plate Ti 6-4 welds*. in *Proceedings of the 1995 7th Conference on Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes, September 10, 1995 - September 15, 1995*. 1995. London, UK: Minerals, Metals & Materials Soc (TMS).
190. Ganne-Chedeville, C., et al., *Temperature and density distribution in mechanical vibration wood welding*. *Wood Science and Technology*, 2006. **40**(1): p. 72-76.
191. Chen, D., C. Zhang, and Y. Li, *Ultrasonic burst phase thermography and its applications*. *Guangxue Xuebao/Acta Optica Sinica*, 2009. **29**(SUPPL.): p. 107-110.
192. Satonaka, S., H. Ohba, and K. Shinozaki. *Nondestructive evaluation of weld defects by infrared thermography*. in *Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Part 5 (of 5), June 18, 1995 - June 22, 1995*. 1995. Copenhagen, Den: ASME.
193. Govardhan, S.M., et al. *Real-time welding process control using infrared sensing*. in *Proceedings of the 1995 American Control Conference. Part 1 (of 6), June 21, 1995 - June 23, 1995*. 1995. Seattle, WA, USA.
194. Venkatraman, B., et al. *Thermography for online detection of incomplete penetration and penetration depth estimation*. in *Proceedings of Asia-Pacific Conference on NDT*. 2006.
195. Venkatraman, B., B. Raj, and M. Menaka, *Online infrared detection of inclusions and lack of penetration during welding*. *Materials Evaluation*, 2005. **63**(9): p. 933-937.
196. Nandhitha, N.M., et al. *Detection and quantification of tungsten inclusion in weld thermographs for on-line weld monitoring by region growing and morphological image processing algorithms*. in *International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications, ICCIMA 2007, December 13, 2007 - December 15, 2007*. 2008. Sivakasi, Tamil Nadu, India: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society.
197. Al-Habaibeh, A. and R. Parkin, *An autonomous low-cost infrared system for the on-line monitoring of manufacturing processes using novelty detection*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2003. **22**(3-4): p. 249-258.
198. Sreedhar, U., et al., *Automatic defect identification using thermal image analysis for online weld quality monitoring*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012. **212**(7): p. 1557-1566.

199. Zitova, B. and J. Flusser, *Image registration methods: a survey*. Image and vision computing, 2003. **21**(11): p. 977-1000.
200. Zhang, L., et al., *Multi-Image Matching for DTM Generation from SPOT-5 HRS/HRG and IRS-P5 Imagery-For the Project of West China Topographic Mapping at 1: 50,000 Scale*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing:[sn], 2008: p. 1109-1116.
201. Scharstein, D. and R. Szeliski, *A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms*. International journal of computer vision, 2002. **47**(1-3): p. 7-42.
202. Ninomiya, H., et al. *An evaluation on robustness and brittleness of HOG features of human detection*. in *Frontiers of Computer Vision (FCV), 2011 17th Korea-Japan Joint Workshop on*. 2011. IEEE.
203. Hermosillo, G., C. Ched'Hotel, and O. Faugeras, *Variational methods for multimodal image matching*. International Journal of Computer Vision, 2002. **50**(3): p. 329-343.
204. Lin, D.-T., *Autonomous sub-image matching for two-dimensional electrophoresis gels using MaxRST algorithm*. Image and Vision Computing, 2010. **28**(8): p. 1267-1279.
205. Aachen, R.-W.T.H., *Matching Algorithms for Image Recognition*. 2010.
206. Henriksson, L., A. Hyvärinen, and S. Vanni, *Representation of cross-frequency spatial phase relationships in human visual cortex*. The Journal of Neuroscience, 2009. **29**(45): p. 14342-14351.
207. Bhattacharyya, D., A. Chakrabarti, and S. Misra. *Design and simulation of parallel algorithms for motion estimation*. in *Information Technology,(ICIT 2007). 10th International Conference on*. 2007. IEEE.
208. Veenman, C.J., E.A. Hendriks, and M.J.T. Reinders. *A fast and robust point tracking algorithm*. IEEE.
209. Heck, A., *Point tracking and image rectification in video activities*. 2005.
210. Plante, A.F., J.M. Fernández, and J. Leifeld, *Application of thermal analysis techniques in soil science*. Geoderma, 2009. **153**(1): p. 1-10.
211. Gjurova, K.M., L.A. Ljubchev, and M.K. Zagortcheva, *Preliminary quantitative determination of petroleum and petroleum products in contaminated soils by using dynamic thermogravimetry*. Thermochemica Acta, 1999. **335**(1-2): p. 55-61.
212. Amonette, J.E. and L.W. Zelazny, *Quantitative thermal analysis of soil materials*. 1994.
213. Zampella, M., et al., *Chromium and copper in micromorphological features and clay fractions of volcanic soils with andic properties*. Geoderma, 2010. **157**(3-4): p. 185-195.
214. Smykatz-Kloss, W., *Application of differential thermal analysis in mineralogy*. Journal of thermal analysis, 1982. **23**(1-2): p. 15-44.
215. Dell'Abate, M.T., A. Benedetti, and P.C. Brookes, *Hyphenated techniques of thermal analysis for characterisation of soil humic substances*. Journal of Separation Science, 2003. **26**(5): p. 433-440.
216. Pérez Pavón, J.L., et al., *Detection of soil pollution by hydrocarbons using headspace-mass spectrometry and identification of compounds by headspace-fast gas chromatography-mass spectrometry*. Journal of Chromatography A, 2004. **1047**(1): p. 101-109.

217. Radu, T. and D. Diamond, *Comparison of soil pollution concentrations determined using AAS and portable XRF techniques*. Journal of Hazardous Materials, 2009. **171**(1–3): p. 1168-1171.
218. Changwen, D., R. Linker, and A. Shaviv, *Characterization of soils using photoacoustic mid-infrared spectroscopy*. Applied spectroscopy, 2007. **61**(10): p. 1063-1067.
219. Linker, R., *Soil classification via mid-infrared spectroscopy*, in *Computer And Computing Technologies In Agriculture, Volume II*. 2008, Springer. p. 1137-1146.
220. Waruru, B.K., et al., *Rapid estimation of soil engineering properties using diffuse reflectance near infrared spectroscopy*. biosystems engineering, 2014. **121**: p. 177-185.
221. Barthès, B.G., et al., *Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) could be used for characterization of soil nematode community*. Soil Biology and Biochemistry, 2011. **43**(8): p. 1649-1659.
222. Lopez, P., et al. *Detection of perturbations in thermal IR signatures: an inverse problem for buried land mine detection*. in *NDE for Health Monitoring and Diagnostics*. 2003. International Society for Optics and Photonics.
223. Stepanić, J., et al., *Parameterisation of non-homogeneities in buried object detection by means of thermography*. Infrared physics & technology, 2004. **45**(3): p. 201-208.
224. Pregowski, P., et al. *Role of time and space variability of moisture and density of sand for thermal detection of buried objects: modeling and experiments*. in *AeroSense'99*. 1999. International Society for Optics and Photonics.
225. Cremer, F., et al. *Stand-off Thermal IR Minefield Survey: System concept and experimental results*. in *Defense and Security*. 2005. International Society for Optics and Photonics.
226. Emery, T. and R. Schwarz. *Infrared signature reduction of military and law enforcement uniforms*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2013. International Society for Optics and Photonics.
227. Rositani, F., et al., *Infrared analysis of carbon blacks*. Carbon, 1987. **25**(3): p. 325-332.
228. Li, D. and G. Sun, *Coloration of textiles with self-dispersible carbon black nanoparticles*. Dyes and Pigments, 2007. **72**(2): p. 144-149.
229. Elkington, P. and G. Curthoys, *Heats of adsorption on carbon black surfaces*. The Journal of Physical Chemistry, 1969. **73**(7): p. 2321-2326.
230. Mehrizi, M.K., et al., *Effect of carbon black nanoparticles on reflective behavior of printed cotton/nylon fabrics in visible/near infrared regions*. Fibers and Polymers, 2012. **13**(4): p. 501-506.
231. Rubeziene, V., et al., *Development of visible and near infrared camouflage textile materials*. Materials Science-Medziagotyra, 2009. **15**(2): p. 173-177.
232. Donnet, J.-B., *Carbon black: science and technology*. 1993: CRC Press.
233. Mehrizi, M.K., et al., *The effect of carbon black nanoparticles on some properties of air plasma printed cotton/polyamide 6 fabrics*. Fibers and Polymers, 2013. **14**(10): p. 1620-1626.
234. He, Y., et al. *Joint image registration and super-resolution using nonlinear least squares method*. in *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2007. ICASSP 2007. IEEE International Conference on*. 2007. IEEE.
235. Keeling, S.L. and W. Ring, *Medical image registration and interpolation by optical flow with maximal rigidity*. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2005. **23**(1): p. 47-65.

236. Moderhak, M., *FFT spectra based matching algorithm for active dynamic thermography*. Quantitative InfraRed Thermography Journal, 2011. **8**(2): p. 239-242.
237. Chetverikov, D. and J. Verestoy. *Tracking feature points: a new algorithm*. in *Pattern Recognition, 1998. Proceedings. Fourteenth International Conference on*. 1998. IEEE.
238. Naito, Y., T. Okatani, and K. Deguchi. *Comparison of the feature point tracking method in image sequences*. in *SICE 2003 Annual Conference*. 2003. IEEE.
239. Nixon, M., *Feature extraction & image processing*. 2008: Academic Press.
240. Xu, B., *Identifying fabric structures with fast Fourier transform techniques*. Textile Research Journal, 1996. **66**(8): p. 496-506.
241. Harris, F.J., *On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform*. Proceedings of the IEEE, 1978. **66**(1): p. 51-83.
242. Prabhu, K., *Window Functions and Their Applications in Signal Processing*. 2013: CRC Press.
243. Moody Jr, E.B., E. Micheli-Tzanakou, and S. Chokroverty, *An adaptive approach to spectral analysis of pattern-reversal visual potentials*. Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, 1989. **36**(4): p. 439-447.
244. Poularikas, A.D., *Handbook of formulas and tables for signal processing*. Vol. 13. 1998: CRC Press.
245. Novotny, M. and M. Sedlacek, *RMS value measurement based on classical and modified digital signal processing algorithms*. Measurement, 2008. **41**(3): p. 236-250.
246. Hidalgo-Gato, R., et al., *Pre-processing techniques of thermal sequences applied to online welding monitoring*. Quantitative InfraRed Thermography Journal, 2012. **9**(1): p. 69-78.
247. Ibarra-Castanedo, C. and X. Maldague, *Pulsed phase thermography reviewed*. Quantitative Infrared Thermography Journal, 2004. **1**(1): p. 47-70.
248. Castanedo, C.I., *Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase*. 2005, Université Laval.
249. Rajic, N., *Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures*. Composite Structures, 2002. **58**(4): p. 521-528.
250. Benítez, H.D., et al., *Procesamiento de imágenes infrarrojas para la detección de defectos en materiales infrared image processing for defect detection in materials*.
251. Porat, B., *Digital processing of random signals: theory and methods*. 1994: Prentice-Hall, Inc.
252. Shepard, S.M., et al., *Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequences*. Optical Engineering, 2003. **42**(5): p. 1337-1342.
253. Ramirez-Granados, J.C., G. Paez, and M. Strojnik. *Dimensionless heat transfer model to compress and analyze pulsed thermography data for NDT of materials*. in *SPIE Defense and Security Symposium*. 2008. International Society for Optics and Photonics.
254. Ibarra-Castanedo, C., et al., *On signal transforms applied to pulsed thermography*. Recent research developments in applied physics, 2006. **9**: p. 101-27.
255. Hidalgo-Gato, R., et al., *Quantification by signal to noise ratio of active infrared thermography data processing techniques*. Optics and Photonics Journal, 2013. **3**(04): p. 20.

256. Jose, J.P. and K. Joseph, *Advances in Polymer Composites: Macro- and Microcomposites – State of the Art, New Challenges, and Opportunities*, in *Polymer Composites*. 2012, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. p. 1-16.
257. Lee, S.M., *Reference book for composites technology*. Vol. 1. 1989: CRC Press.
258. Yang, H., *Kevlar aramid fiber*. 1993: Wiley.
259. Groover, M.P., *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*. 2007: John Wiley & Sons.
260. Washer, G., T. Brooks, and R. Saulsberry, *Condition Assessment of Kevlar Composite Materials Using Raman Spectroscopy*. 2007.
261. Genest, M. and A. Fahr. *Thermography for non-destructive evaluation of composite structures*. in *Design, manufacturing and applications of composites*. In: *Proceedings of the sixth joint Canada–Japan workshop on composites*. USA: DEStech Publications Inc. 2006.
262. Ibarra-Castanedo, C., et al., *Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures*. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2009. **20**(1): p. 1-31.
263. Bendada, A., et al., *How to reveal subsurface defects in Kevlar® composite materials after an impact loading using infrared vision and optical NDT techniques?* *Engineering Fracture Mechanics*, 2013. **108**: p. 195-208.
264. Manohar, A. and F.L. di Scalea, *Modeling 3D heat flow interaction with defects in composite materials for infrared thermography*. *NDT & E International*, 2014. **66**: p. 1-7.
265. Andrés Álvarez, J.R., et al., *Identification of carbon black in military textiles using infrared imaging techniques*. 2013.
266. Hellier, C. and C. Hellier, *Handbook of nondestructive evaluation*. Vol. 10. 2001: McGraw-Hill New York.
267. Crewe, R., J. Staggs, and P. Williams, *Drag-induced apparent mass gain in thermogravimetry*. *Polymer Degradation and Stability*, 2007. **92**(11): p. 2070-2075.
268. Danley, R.L., *New heat flux DSC measurement technique*. *Thermochimica acta*, 2002. **395**(1): p. 201-208.
269. Yaman, M., Y. Dilgin, and S. Gucer, *Speciation of lead in soils and relation with its concentration in fruits*. *Analytica Chimica Acta*, 2000. **410**(1–2): p. 119-125.
270. Knox, N.M., et al., *Modelling soil carbon fractions with visible near-infrared (VNIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopy*. *Geoderma*, 2015. **239–240**(0): p. 229-239.
271. Viscarra Rossel, R.A., et al., *Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties*. *Geoderma*, 2006. **131**(1–2): p. 59-75.
272. Martínez, P.L., *Detection of Landmines from Measured Infrared Images using Thermal Modeling of the Soil*. 2003: University of Santiago de Compostela, Department of Electronics and Computer Science.
273. Kluge, B., et al., *Detection of soil microbial activity by infrared thermography (IRT)*. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013. **57**(0): p. 383-389.
274. Zilioli, E., M. Gomasasca, and R. Tomasoni, *Application of terrestrial thermography to the detection of waste-disposal sites*. *Remote Sensing of Environment*, 1992. **40**(2): p. 153-160.
275. Madruga, F.J., et al. *Field test of infrared thermography applied to biogas controlling in landfill sites*. in *Defense and Security Symposium*. 2007. International Society for Optics and Photonics.

276. Shahraeeni, E. and D. Or, *Thermo-evaporative fluxes from heterogeneous porous surfaces resolved by infrared thermography*. Water Resources Research, 2010. **46**(9).
277. Hahn, F., et al., *Escherichia coli detection using thermal images*. Canadian Biosystems Engineering, 2006. **48**: p. 4.
278. Luong, M.-P., *Introducing infrared thermography in soil dynamics*. Infrared physics & technology, 2007. **49**(3): p. 306-311.
279. Maldague, X., *Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation*. Trends in optical nondestructive testing, 2000: p. 591-609.
280. Maldague, X.P., *Introduction to NDT by active infrared thermography*. Materials Evaluation, 2002. **60**(9): p. 1060-1073.
281. Basheer, I. and M. Hajmeer, *Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application*. Journal of microbiological methods, 2000. **43**(1): p. 3-31.
282. Dowla, F.U., *Solving problems in environmental engineering and geosciences with artificial neural networks*. 1995: MIT Press.
283. Porta Casanellas, J., M. López-Acevedo-Reguerín, and C. Roquero de Laburu, *Edafología: para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 1998, Mundi-Prensa, Madrid.
284. Sendur, I.K. and B.A. Baertlein. *Numerical simulation of thermal signatures of buried mines over a diurnal cycle*. in *AeroSense 2000*. 2000. International Society for Optics and Photonics.
285. Almond, D.P. and P. Patel, *Photothermal science and techniques*. Vol. 10. 1996: Springer.
286. Ibarra-Castanedo, C., A. Bendada, and X. Maldague. *Thermographic image processing for NDT*. in *IV Conferencia Panamericana de END*. 2007. Citeseer.
287. Montano, J., *Redes neuronales artificiales aplicadas al análisis de datos [Artificial neural networks applied to data analysis]*. Unpublished doctoral dissertation, Balearic Islands University, Spain, 2002.
288. Jiménez, E., *Aplicación de descriptores de Fourier y redes neuronales artificiales para el reconocimiento de formas*. Universidad de Jaume I, España, Tesis, 2006.
289. García Estévez, P., *Aplicaciones de las Redes Neuronales en las Finanzas*. 2002.

8.2. Referencias ordenadas alfabéticamente

- AACHEN, R.-W.T.H., *Matching Algorithms for Image Recognition*. 2010.
- Albatici, R. and A.M. Tonelli, *Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site*. *Energy and Buildings*, 2010. **42**(11): p. 2177-2183.
- Albendea, P., et al. *Signal to noise ratio (SNR) comparison for pulsed thermographic data processing methods applied to welding defect detection*. in *X International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. 2010.
- Al-Habaibeh, A. and R. Parkin, *An autonomous low-cost infrared system for the on-line monitoring of manufacturing processes using novelty detection*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2003. **22**(3-4): p. 249-258.
- Al-Karawi, J. and J. Schmidt. *Application of Infrared Thermography to the analysis of Welding processes*. in *7th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, Belgium*. 2004.
- Allouis, C., R. Pagliara, and A. Saponaro, *Fast infrared imaging for combustion stability analysis of industrial burners*. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012. **43**: p. 2-8.
- Almond, D.P. and P. Patel, *Photothermal science and techniques*. Vol. 10. 1996: Springer.
- Amonette, J.E. and L.W. Zelazny, *Quantitative thermal analysis of soil materials*. 1994.
- Andonova, A., *Preventive diagnostics of Instrumentation and Automation by thermographic measurements*.
- Andrés Álvarez, J.R., et al., *Identification of carbon black in military textiles using infrared imaging techniques*. 2013.
- Asdrubali, F., G. Baldinelli, and F. Bianchi, *A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings*. *Applied Energy*, 2012. **97**(0): p. 365-373.
- Assler, H. and J. Telgkamp, *Design of aircraft structures under special consideration of NDT*. 9th ECNDT, September, 2006: p. 25-29.
- Astarita, T., G. Cardone, and G. Carlomagno, *Infrared thermography: An optical method in heat transfer and fluid flow visualisation*. *Optics and lasers in engineering*, 2006. **44**(3): p. 261-281.
- Avdelidis, N.P. and X. Maldague, *NDT characterisation of carbon-fibre and glass-fibre composites using non-invasive imaging techniques*. *Proc. of QIRT*, 2010.
- Bagavathiappan, S., et al., *Infrared thermography for condition monitoring—a review*. *Infrared Physics & Technology*, 2013. **60**: p. 35-55.
- Balbinot, L.F., et al., *Repeatability of infrared plantar thermography in diabetes patients: a pilot study*. *Journal of diabetes science and technology*, 2013. **7**(5): p. 1130-1137.
- Banerjee, P., S. Govardhan, and B. Chin. *Infrared sensing for on-line weld process monitoring and control*. in *1993 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics*. 1993.

- Barthès, B.G., et al., *Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) could be used for characterization of soil nematode community*. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011. **43**(8): p. 1649-1659.
- Basheer, I. and M. Hajmeer, *Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application*. *Journal of microbiological methods*, 2000. **43**(1): p. 3-31.
- Beattie, A., *Acoustic emission, principles and instrumentation*. *Journal of acoustic emission*, 1983. **2**(12): p. 95-128.
- Bendada, A., et al., *Active thermography data processing for the NDT&E of frescoes*. *QIRT 2010*, 2010: p. 27-30.
- Bendada, A., et al., *How to reveal subsurface defects in Kevlar® composite materials after an impact loading using infrared vision and optical NDT techniques?* *Engineering Fracture Mechanics*, 2013. **108**: p. 195-208.
- Benitez Restrepo, H.D., et al., *Procesamiento de imágenes infrarrojas para la detección de defectos en materiales*. *Revista Tecnura*, 2007. **10**(20): p. 40-51.
- Benítez, H.D., et al., *Definition of a new thermal contrast and pulse correction for defect quantification in pulsed thermography*. *Infrared Physics & Technology*, 2008. **51**(3): p. 160-167.
- Berry, B. *A combined approach for using thermography for the detection of diabetes mellitus*. in *SPIE Sensing Technology Applications*. 2014. International Society for Optics and Photonics.
- Bhattacharyya, D., A. Chakrabarti, and S. Misra. *Design and simulation of parallel algorithms for motion estimation*. in *Information Technology, (ICIT 2007)*. *10th International Conference on*. 2007. IEEE.
- Bhowmik, A., R. Repaka, and S.C. Mishra, *Thermographic evaluation of early melanoma within the vascularized skin using combined non-Newtonian blood flow and bioheat models*. *Computers in biology and medicine*, 2014. **53**: p. 206-219.
- Bianchi, F., G. Baldinelli, and F. Asdrubali. *A quantitative infrared thermography method for the assessment of windows thermal transmittance*. in *Proceedings of the 10th International Conference on Applied and Theoretical Mechanics (MECHANICS'14)*. 2014.
- Bison, P. and E. Grinzato. *IR thermography applied to the assessment of thermal conductivity of building materials*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2010. International Society for Optics and Photonics.
- Bison, P., et al. *Evaluation of frescoes detachments by partial least square thermography*. 2014. QIRT.
- Bison, P., et al. *Thermographic analysis of the thermal properties of wood for wooden windows*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2013. International Society for Optics and Photonics.
- Blitz, J., *Electrical and magnetic methods of non-destructive testing*. Vol. 3. 1997: Springer Science & Business Media.

- Bonmarin, M. and F.-A. Le Gal, *Lock-in thermal imaging for the early-stage detection of cutaneous melanoma: A feasibility study*. Computers in biology and medicine, 2014. **47**: p. 36-43.
- Borchardt, T.B., et al., *Breast thermography from an image processing viewpoint: A survey*. Signal Processing, 2013. **93**(10): p. 2785-2803.
- Bossi, R.H., F.A. Iddings, and G.C. Wheeler, *Radiographic testing*. Vol. 4. 2002: Amer Society for Nondestructive.
- Bougeard, D., S. Russeil, and N. François, *Determination of local heat transfer coefficient distribution on a vortex enhanced finned-tube heat exchanger fin using infrared thermography*.
- Brachelet, F., et al. *Detection of reinforcement bars in concrete slabs by infrared thermography and microwaves excitation*. in *The 12th International Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT 2014)*.
- Broberg, P., *Surface crack detection in welds using thermography*. NDT & E International, 2013. **57**: p. 69-73.
- Candoré, J.C., et al. *Approach of the measurement of thermal diffusivity of mural paintings by front face photothermal radiometry*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2010. IOP Publishing.
- Cannard, H., et al., *The use of infrared thermography for defects detection on reinforced concrete bridges*.
- Carlomagno, G.M. and G. Cardone, *Infrared thermography for convective heat transfer measurements*. Experiments in fluids, 2010. **49**(6): p. 1187-1218.
- Castanedo, C.I., *Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase*. 2005, Université Laval.
- Çetingül, M.P. and C. Herman, *Quantification of the thermal signature of a melanoma lesion*. International Journal of Thermal Sciences, 2011. **50**(4): p. 421-431.
- Chacon-Murguía, M.I., A.J. Villalobos-Montiel, and J.D. Calderon-Contreras, *Thermal Image Processing for Breast Symmetry Detection Oriented to Automatic Breast Cancer Analysis*, in *Pattern Recognition*. 2014, Springer. p. 271-280.
- Chang, K., et al., *Rapid vs. Delayed Infrared Responses after Ischemia Reveal Recruitment of Different Vascular Beds*.
- Changwen, D., R. Linker, and A. Shaviv, *Characterization of soils using photoacoustic mid-infrared spectroscopy*. Applied spectroscopy, 2007. **61**(10): p. 1063-1067.
- Charlesworth, J.P. and J.A.G. Temple, *Engineering applications of ultrasonic time-of-flight diffraction*. 2001: Research Studies PressLtd.
- Chen, C.-h., *Ultrasonic and advanced methods for nondestructive testing and material characterization*. 2007: World Scientific.
- Chen, D., C. Zhang, and Y. Li, *Ultrasonic burst phase thermography and its applications*. Guangxue Xuebao/Acta Optica Sinica, 2009. **29**(SUPPL.): p. 107-110.

- Chetverikov, D. and J. Verestoy. *Tracking feature points: a new algorithm*. in *Pattern Recognition, 1998. Proceedings. Fourteenth International Conference on*. 1998. IEEE.
- Chinakhov, D., *Influence of gas shielding conditions upon the thermal processes in weld joints when welding with a consumable electrode*.
- Cho, J., et al. *Thermosonic inspection of a welded SUS plate*. in *2006 SICE-ICASE International Joint Conference, October 18, 2006 - October 21, 2006*. 2006. Busan, Korea, Republic of: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society.
- Choi, M., et al., *Defects Detection in GFRP Composites by using Transmission method of Infrared Thermography*.
- Chuah, T.K., et al., *Active infrared sensing of impact damage in carbon fibre reinforced polymer*.
- Closa González, P. and R. Grau Mur, *Las emisiones acústicas y su aplicación al mantenimiento predictivo; Estudio de la aplicabilidad de la teoría de las EA al mantenimiento predictivo*.
- Cobo, A., et al. *Arc-welding process control based on back face thermography: application to the manufacturing of nuclear steam generators*. in *Defense and Security Symposium*. 2007. International Society for Optics and Photonics.
- Cremer, F., et al. *Stand-off Thermal IR Minefield Survey: System concept and experimental results*. in *Defense and Security*. 2005. International Society for Optics and Photonics.
- Crewe, R., J. Staggs, and P. Williams, *Drag-induced apparent mass gain in thermogravimetry*. *Polymer Degradation and Stability*, 2007. **92**(11): p. 2070-2075.
- Cuccurullo, G., V. Spingi, and R. Di Giuda. *Thermal effects in dry sliding contacts*. in *11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*.
- da Costa Bortoni, E. and R.T. Siniscalchi. *Thermographic evaluation of hydrogenerator losses*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2012. International Society for Optics and Photonics.
- da Costa Bortoni, E., et al., *Losses estimation in induction motors using infrared thermography techniques*.
- da Silva, R.R. and D. Mery, *State-of-the-Art of weld seam inspection by radiographic testing: part i-image processing*. *Materials Evaluation*, 2007. **65**(6): p. 643-647.
- Danley, R.L., *New heat flux DSC measurement technique*. *Thermochimica acta*, 2002. **395**(1): p. 201-208.
- Dell'Abate, M.T., A. Benedetti, and P.C. Brookes, *Hyphenated techniques of thermal analysis for characterisation of soil humic substances*. *Journal of Separation Science*, 2003. **26**(5): p. 433-440.
- Distefano, G. and F. Freni, *Dynamic thermograms processing for the optimization and the automation of hydrocarbons pollution on sea surface detection*.
- dit Leksir, Y.L., S. Bouhouche, and M. Bouchrit, *Automatic Diagnosis of Iron and steel Equipment using Infrared Thermography*.

- Donnet, J.-B., *Carbon black: science and technology*. 1993: CRC Press.
- Dorsch, F., et al. *Online NIR diagnostic of laser welding processes and its potential for quality assuring sensor systems*. in *SPIE LASE*. 2014. International Society for Optics and Photonics.
- Dowla, F.U., *Solving problems in environmental engineering and geosciences with artificial neural networks*. 1995: MIT Press.
- Dumoulin, J., et al., *Evaluation of FRP gluing on concrete structures by active infrared thermography*. QIRT'10}, 2010: p. 155-163.
- Dunegan, H., D. Harris, and C. Tatro, *Fracture analysis by use of acoustic emission*. *Engineering Fracture Mechanics*, 1968. **1**(1): p. 105-122.
- Elkington, P. and G. Curthoys, *Heats of adsorption on carbon black surfaces*. *The Journal of Physical Chemistry*, 1969. **73**(7): p. 2321-2326.
- Emery, T. and R. Schwarz. *Infrared signature reduction of military and law enforcement uniforms*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2013. International Society for Optics and Photonics.
- Fan, J., et al. *Rapid measurement of fatigue behavior of welded joints using the lock-in infrared thermography*. in *11th International conference on quantitative infrared thermography*. 2012.
- Fan, J., X. Guo, and C. Wu, *A new application of the infrared thermography for fatigue evaluation and damage assessment*. *International Journal of Fatigue*, 2012. **44**: p. 1-7.
- Feng, L.Q., et al., *Experimental Study of Infrared Thermography for Detecting Internal Defect of Mortar Finishing Layer*. *Applied Mechanics and Materials*, 2013. **351**: p. 1312-1317.
- Fidali, M. and W. Jamrozik, *Diagnostic method of welding process based on fused infrared and vision images*. *Infrared Physics & Technology*, 2013. **61**: p. 241-253.
- Filipczyński, L., Z. Pawłowski, and J. Wehr, *Ultrasonic methods of testing materials*. 1966: Butterworths.
- Fokaides, P.A. and S.A. Kalogirou, *Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes*. *Applied Energy*, 2011. **88**(12): p. 4358-4365.
- Frappier, R., et al., *Quantitative infrared analysis of welding processes: temperature measurement during RSW and CMT-MIG welding*. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2014. **19**(1): p. 38-43.
- Galietti, U., et al. *Fatigue limit evaluation of martensitic steels with thermal methods*. in *The 12th International Conference of Quantitative Infrared Thermography, QIRT, Bordeaux*. 2014.
- Ganne-Chedeville, C., et al., *Temperature and density distribution in mechanical vibration wood welding*. *Wood Science and Technology*, 2006. **40**(1): p. 72-76.
- García Estévez, P., *Aplicaciones de las Redes Neuronales en las Finanzas*. 2002.

- Gavrilov, D., et al., *A comparison of near-and mid-infrared band reflectography in the diagnostics of artwork*. 2010.
- Genest, M. and A. Fahr. *Thermography for non-destructive evaluation of composite structures*. in *Design, manufacturing and applications of composites*. In: *Proceedings of the sixth joint Canada–Japan workshop on composites*. USA: DEStech Publications Inc. 2006.
- Gjurova, K.M., L.A. Ljubchev, and M.K. Zagortcheva, *Preliminary quantitative determination of petroleum and petroleum products in contaminated soils by using dynamic thermogravimetry*. *Thermochimica Acta*, 1999. **335**(1–2): p. 55-61.
- Golzke, H., P. Leick, and A. Dreizler, *Differential Infrared Thermography of Gasoline Direct Injection Sprays*.
- González, D.A., *Contribuciones a las técnicas no destructivas para evaluación y prueba de procesos y materiales basadas en radiaciones infrarrojas*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones. Universidad de Cantabria, 2006.
- González, F., et al., *Thermal signature of melanoma and non-melanoma skin cancers*.
- Gonzalez, R.C. and R.E. Woods, *Digital imaging processing*. 9e191, 2002: p. 18.
- Govardhan, S.M., et al. *Real-time welding process control using infrared sensing*. in *Proceedings of the 1995 American Control Conference. Part 1 (of 6), June 21, 1995 - June 23, 1995*. 1995. Seattle, WA, USA.
- Grinzato, E., et al. *High resolution and automatic survey of buildings by IR thermography*. in *10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Quebec, July*. 2010.
- Grinzato, E., et al. *R-value estimation by local thermographic analysis*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2010. International Society for Optics and Photonics.
- Groover, M.P., *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*. 2007: John Wiley & Sons.
- Grosse, C.U. and M. Ohtsu, *Acoustic emission testing*. 2008: Springer Science & Business Media.
- Guo, X. and F. Zhang. *Study on pulsed thermography to detect water ingress in composite honeycomb panels*. in *11th International Conference on Quantitative Infrared Thermography*. 2012.
- Hahn, F., et al., *Escherichia coli detection using thermal images*. *Canadian Biosystems Engineering*, 2006. **48**: p. 4.
- Halmshaw, R., *Introduction to Non-Destructive Testing*. *Non-Destructive Testing*, 1989: p. 1-72.
- Halmshaw, R., R. Honeycombe, and P. Hancock, *Non-destructive testing*. 1991: E. Arnold.
- Harley, J.L., et al. *Spatially resolved infrared spectra of F109 turbofan exhaust*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2012. International Society for Optics and Photonics.

- Harris, F.J., *On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform*. Proceedings of the IEEE, 1978. **66**(1): p. 51-83.
- He, Y., et al. *Joint image registration and super-resolution using nonlinear least squares method*. in *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2007. ICASSP 2007. IEEE International Conference on*. 2007. IEEE.
- Heck, A., *Point tracking and image rectification in video activities*. 2005.
- Hellier, C. and C. Hellier, *Handbook of nondestructive evaluation*. Vol. 10. 2001: McGraw-Hill New York.
- Hellier, C.J., *Handbook of Nondestructive Evaluation*. 3rd Edition McGraw-Hill Professional, New York, 2003.
- Henriksson, L., A. Hyvärinen, and S. Vanni, *Representation of cross-frequency spatial phase relationships in human visual cortex*. The Journal of Neuroscience, 2009. **29**(45): p. 14342-14351.
- Herman, C., *The role of dynamic infrared imaging in melanoma diagnosis*. 2013.
- Hermosillo, G., C. Ched'Hotel, and O. Faugeras, *Variational methods for multimodal image matching*. International Journal of Computer Vision, 2002. **50**(3): p. 329-343.
- Hidalgo-Gato, R., et al., *Pre-processing techniques of thermal sequences applied to online welding monitoring*. Quantitative InfraRed Thermography Journal, 2012. **9**(1): p. 69-78.
- Hidalgo-Gato, R., et al., *Quantification by signal to noise ratio of active infrared thermography data processing techniques*. Optics and Photonics Journal, 2013. **3**(04): p. 20.
- Holst, G.C., *Common sense approach to thermal imaging*. 2000: SPIE Optical Engineering Press Washington, DC, USA:.
- Hongxia, Z., et al., *Prediction of AZ31B Magnesium Alloy Fatigue Life Based on Infrared Thermography*. Rare Metal Materials and Engineering, 2014. **43**(10): p. 2525-2529.
- Huang, R.-S., L.-M. Liu, and G. Song, *Infrared temperature measurement and interference analysis of magnesium alloys in hybrid laser-TIG welding process*. Materials Science and Engineering: A, 2007. **447**(1): p. 239-243.
- Huda, A.N. and S. Taib, *Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment*. Applied Thermal Engineering, 2013. **61**(2): p. 220-227.
- Ibarra-Castanedo, C. and X. Maldague, *Pulsed phase thermography reviewed*. Quantitative Infrared Thermography Journal, 2004. **1**(1): p. 47-70.
- Ibarra-Castanedo, C., A. Bendada, and X. Maldague. *Thermographic image processing for NDT*. in *IV Conferencia Panamericana de END*. 2007. Citeseer.
- Ibarra-Castanedo, C., et al. *Active thermography signal processing techniques for defect detection and characterization on composite materials*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2010. International Society for Optics and Photonics.

- Ibarra-Castanedo, C., et al. *Nondestructive testing of externally reinforced structures for seismic retrofitting using flax fiber reinforced polymer (FFRP) composites*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2013. International Society for Optics and Photonics.
- Ibarra-Castanedo, C., et al. *Review of thermal-contrast-based signal processing techniques for the nondestructive testing and evaluation of materials by infrared thermography*. in *Proc. Int. Workshop on Imaging NDE (Kalpakkam, India, 25–28 April 2007)*. 2007.
- Ibarra-Castanedo, C., et al. *Water ingress detection in honeycomb sandwich panels by passive infrared thermography using a high-resolution thermal imaging camera*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2012. International Society for Optics and Photonics.
- Ibarra-Castanedo, C., et al., *Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures*. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2009. **20**(1): p. 1-31.
- Ibarra-Castanedo, C., et al., *Detection and characterization of water ingress in honeycomb structures by passive and active infrared thermography using a high resolution camera*.
- Ibarra-Castanedo, C., et al., *On signal transforms applied to pulsed thermography*. *Recent research developments in applied physics*, 2006. **9**: p. 101-27.
- Jaeger, J.C. and H.S. Carslaw, *Conduction of heat in solids*. 1988: Clarendon.
- Jiménez, E., *Aplicación de descriptores de Fourier y redes neuronales artificiales para el reconocimiento de formas*. Universidad de Jaume I, España, Tesis, 2006.
- Jose, J.P. and K. Joseph, *Advances in Polymer Composites: Macro- and Microcomposites – State of the Art, New Challenges, and Opportunities*, in *Polymer Composites*. 2012, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. p. 1-16.
- Kastek, M., et al. *Thermographics measurements and numerical simulation of a car brakes*. in *11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. 2012.
- Kauppinen, T. and S. Siikanen. *Building thermography and energy performance directive of buildings*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2012. International Society for Optics and Photonics.
- Kazantsev, I.G., et al., *Statistical detection of defects in radiographic images in nondestructive testing*. *Signal Processing*, 2002. **82**(5): p. 791-801.
- Keeling, S.L. and W. Ring, *Medical image registration and interpolation by optical flow with maximal rigidity*. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2005. **23**(1): p. 47-65.
- Kleinfeld, J.M. *An evaluation of the impact of an example of thermal bridging in buildings and a design alternative*. 2012.
- Kluge, B., et al., *Detection of soil microbial activity by infrared thermography (IRT)*. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013. **57**(0): p. 383-389.

- Knox, N.M., et al., *Modelling soil carbon fractions with visible near-infrared (VNIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopy*. *Geoderma*, 2015. **239–240**(0): p. 229-239.
- Kottilingam, S.C., H.C. Wikle Iii, and B.A. Chin. *Real-Time Monitoring and Control of Weld Penetration for Submerged Arc Welding Process*. in *ASM Proceedings of the International Conference: Trends in Welding Research*. 1998.
- Kowal, L., K. Turewicz, and T. Kruczek, *Measurements of temperature of brake disks in hoisting machines of mine shaft hoists*.
- Krankenhagen, R., G. Kervalishvili, and C. Maierhofer. *Influence of air-gaps on the thermal behaviour of the plaster-concrete bond*. in *Proc. of QIRT 2010 Conference*. 2010.
- Krapez, J., et al., *Combined airborne thermography and visible-to-near infrared reflectance measurement for soil moisture mapping*.
- Kremkau, F.W., *Diagnostic ultrasound: principles and instruments*. 2001: WB Saunders Company.
- Kujawinska, M., M. Bukalska, and G. Dymny, *Hybrid Digital Image Correlation/Thermovision system for monitoring of civil engineering structures*. Proc. 10th Int. Conferenceon Quantitative InfraRed Termography QIRT10, 2010: p. 173-178.
- Kurita, K., et al., *Active infrared thermographic inspection technique for elevated concrete structures using remote heating system*. *Infrared Physics & Technology*, 2009. **52**(5): p. 208-213.
- Lagüela, S., et al., *Calibration and verification of thermographic cameras for geometric measurements*. *Infrared Physics & Technology*, 2011. **54**(2): p. 92-99.
- Laranjeira, J., et al., *Passive thermography evaluation of bonding defects in adhered ceramic tiling: experimental and in-situ assessments*.
- Larbi Youcef, M., et al. *Diagnostic of insulated building walls of old restored constructions using active infrared thermography*. in 10 th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, Québec, Canada.[Links]. 2010.
- Larsen, C.A., *Document flash thermography*. 2011.
- Lee, S.M., *Reference book for composites technology*. Vol. 1. 1989: CRC Press.
- Li, D. and G. Sun, *Coloration of textiles with self-dispersible carbon black nanoparticles*. *Dyes and Pigments*, 2007. **72**(2): p. 144-149.
- Lin, D.-T., *Autonomous sub-image matching for two-dimensional electrophoresis gels using MaxRST algorithm*. *Image and Vision Computing*, 2010. **28**(8): p. 1267-1279.
- Linares, R., et al. *Monitoring of industrial welding processes using high-speed uncooled MWIR imaging sensors*. in *SPIE Sensing Technology+ Applications*. 2014. International Society for Optics and Photonics.
- Linker, R., *Soil classification via mid-infrared spectroscopy*, in *Computer And Computing Technologies In Agriculture, Volume II*. 2008, Springer. p. 1137-1146.

- Liu, W.-M., et al., *Reconstruction of thermographic signals to map perforator vessels in humans*. Quantitative infrared thermography journal, 2012. **9**(2): p. 123-133.
- Lockner, D. *The role of acoustic emission in the study of rock fracture*. in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1993. Elsevier.
- López, F., et al. *Comparative study of thermographic signal reconstruction and partial least squares thermography for the detection and evaluation of subsurface defects*. in *12th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, Bordeaux, France*. 2014.
- López, F., et al., *Multivariate Infrared Signal Processing by Partial Least-Squares Thermography*. Québec, Canada, 2013.
- Lopez, F., et al., *Optimization of pulsed thermography inspection by partial least-squares regression*. NDT & E International, 2014. **66**: p. 128-138.
- Lopez, P., et al. *Detection of perturbations in thermal IR signatures: an inverse problem for buried land mine detection*. in *NDE for Health Monitoring and Diagnostics*. 2003. International Society for Optics and Photonics.
- Lord, W. and R. Palanisamyx. *Development of theoretical models for nondestructive testing eddy-current phenomena*. in *Eddy-current Characterization of Materials and Structures: A Symposium*. 1981. ASTM International.
- Lord, W., *Electromagnetic methods of nondestructive testing*. 1985.
- Lovejoy, D., *Magnetic Particle Inspection: A Practical Guide*. David Lovejoy. 1993: Springer Science & Business Media.
- Luhmann, T., J. Piechel, and T. Roelfs, *Geometric calibration of thermographic cameras*, in *Thermal Infrared Remote Sensing*. 2013, Springer. p. 27-42.
- Luna, R.A., A.L.L. Sánchez, and A.A.E. Juárez, *Sistema ultrasónico para inspección automática de componentes industriales por inmersión*.
- Luong, M.-P., *Introducing infrared thermography in soil dynamics*. Infrared physics & technology, 2007. **49**(3): p. 306-311.
- Madruga, F.J., et al. *Enhanced contrast detection of subsurface defects by pulsed infrared thermography based on the fourth order statistic moment, kurtosis*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2009. International Society for Optics and Photonics.
- Madruga, F.J., et al. *Field test of infrared thermography applied to biogas controlling in landfill sites*. in *Defense and Security Symposium*. 2007. International Society for Optics and Photonics.
- Madruga, F.J., et al., *Infrared thermography processing based on higher-order statistics*. NDT & E International, 2010. **43**(8): p. 661-666.
- Maillet, D., *Thermal quadrupoles: solving the heat equation through integral transforms*. 2000: John Wiley & Sons Inc.
- Maldague, X., *Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation*. Trends in optical nondestructive testing, 2000: p. 591-609.

- Maldague, X., *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. 2001.
- Maldague, X.P., *Introduction to NDT by active infrared thermography*. Materials Evaluation, 2002. **60**(9): p. 1060-1073.
- Manohar, A. and F.L. di Scalea, *Modeling 3D heat flow interaction with defects in composite materials for infrared thermography*. NDT & E International, 2014. **66**: p. 1-7.
- Martínez, P.L., *Detection of Landmines from Measured Infrared Images using Thermal Modeling of the Soil*. 2003: University of Santiago de Compostela, Department of Electronics and Computer Science.
- McMaster, R.C., P. McIntire, and M.L. Mester, *Electromagnetic testing: eddy current, flux leakage, and microwave nondestructive testing*. 1986: American Society for Nondestructive Testing.
- Mehrizi, M.K., et al., *Effect of carbon black nanoparticles on reflective behavior of printed cotton/nylon fabrics in visible/near infrared regions*. Fibers and Polymers, 2012. **13**(4): p. 501-506.
- Mehrizi, M.K., et al., *The effect of carbon black nanoparticles on some properties of air plasma printed cotton/polyamide 6 fabrics*. Fibers and Polymers, 2013. **14**(10): p. 1620-1626.
- Meola, C. and G.M. Carlomagno, *Impact damage in GFRP: new insights with infrared thermography*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010. **41**(12): p. 1839-1847.
- Meola, C., et al., *Analysis of stainless steel welded joints: A comparison between destructive and non-destructive techniques*. Journal of Materials Processing Technology, 2004. **155-156**(1-3): p. 1893-1899.
- Meola, C., et al., *The use of infrared thermography for nondestructive evaluation of joints*. Infrared Physics and Technology, 2004. **46**(1-2 SPEC. ISS.): p. 93-99.
- Mihai, A., et al., *Composite Materials Flaws Detection and Measurement by Infrared Thermography*.
- Miller, R.K. and P. McIntire, *Nondestructive Testing Handbook. Vol. 5: Acoustic Emission Testing*. American Society for Nondestructive Testing, 4153 Arlingate Plaza, Caller# 28518, Columbus, Ohio 43228, USA, 1987. 603, 1987.
- Milosevic, M., D. Jankovic, and A. Peulic, *Thermography based breast cancer detection using texture features and minimum variance quantization*.
- Ming, L., Z. Zhi-wei, and L. ZHI-hui, *Key Technical Study of Infrared Thermography on Aerodynamic Heating Measurement in Hypersonic Wind Tunnel*.
- Moderhak, M., *FFT spectra based matching algorithm for active dynamic thermography*. Quantitative InfraRed Thermography Journal, 2011. **8**(2): p. 239-242.
- Montano, J., *Redes neuronales artificiales aplicadas al análisis de datos [Artificial neural networks applied to data analysis]*. Unpublished doctoral dissertation, Balearic Islands University, Spain, 2002.

- Moody Jr, E.B., E. Micheli-Tzanakou, and S. Chokroverty, *An adaptive approach to spectral analysis of pattern-reversal visual potentials*. Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, 1989. **36**(4): p. 439-447.
- Mori, T., et al., *Morphological pattern classification system for plantar thermography of patients with diabetes*. Journal of diabetes science and technology, 2013. **7**(5): p. 1102-1112.
- Mulaveesala, R., et al. *Nondestructive testing and evaluation of composites by non-invasive IR Imaging techniques*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2013. International Society for Optics and Photonics.
- Mulaveesala, R., et al. *Pulse compression approach to digitized frequency modulated infrared imaging for non-destructive testing of carbon fibre reinforced polymers*. in *SPIE Sensing Technology+ Applications*. 2014. International Society for Optics and Photonics.
- Nahant, M., S. Paez, and J. Van Leeuwen. *Detection by infrared thermography of the heat signature of diseases and defects in concrete structures of civil engineering*. in *Qirt10, 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. 2010.
- Naito, Y., T. Okatani, and K. Deguchi. *Comparison of the feature point tracking method in image sequences*. in *SICE 2003 Annual Conference*. 2003. IEEE.
- Nandhitha, N.M., et al. *Detection and quantification of tungsten inclusion in weld thermographs for on-line weld monitoring by region growing and morphological image processing algorithms*. in *International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications, ICCIMA 2007, December 13, 2007 - December 15, 2007*. 2008. Sivakasi, Tamil Nadu, India: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society.
- Naranjo, E. and S.B.P. Bernascolle. *IR gas imaging in an industrial setting*. in *Proc. SPIE*. 2010.
- Negi, V. and S. Chattopadhyaya, *Critical Assessment of Temperature Distribution in Submerged Arc Welding Process*. Advances in Materials Science and Engineering, 2013. **2013**.
- Nino, G.F., et al., *Thermal NDI of resistance welded composite structures*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(3): p. 237-248.
- Ninomiya, H., et al. *An evaluation on robustness and brittleness of HOG features of human detection*. in *Frontiers of Computer Vision (FCV), 2011 17th Korea-Japan Joint Workshop on*. 2011. IEEE.
- Nixon, M., *Feature extraction & image processing*. 2008: Academic Press.
- Novotny, M. and M. Sedlacek, *RMS value measurement based on classical and modified digital signal processing algorithms*. Measurement, 2008. **41**(3): p. 236-250.
- Olbrycht, R. and B. Wiecek, *New approach to thermal drift correction and gain determination in microbolometer thermal cameras*.
- Olympus, N., *Introduction to phased array ultrasonic technology applications*. D Tech Guideline", Olympus NDT, 2004.

- Ortega, A.R., et al. *Analysis of buckling distortion in bead-on-plate Ti 6-4 welds*. in *Proceedings of the 1995 7th Conference on Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes, September 10, 1995 - September 15, 1995*. 1995. London, UK: Minerals, Metals & Materials Soc (TMS).
- Park, H.S., et al., *Study on the Qualitative Defects Detection in Composites by Optical Infrared Thermography*. 2011.
- Pascoe, D., et al. *International standards for pandemic screening using infrared thermography*. in *SPIE Medical Imaging*. 2010. International Society for Optics and Photonics.
- Pérez Pavón, J.L., et al., *Detection of soil pollution by hydrocarbons using headspace–mass spectrometry and identification of compounds by headspace–fast gas chromatography–mass spectrometry*. *Journal of Chromatography A*, 2004. **1047**(1): p. 101-109.
- Pezzani, F. and A. Salerno, *Thermoelastic investigation of a servo-actuated hydraulic plastic valve undergoing a time dependant internal pressure variation*.
- Plante, A.F., J.M. Fernández, and J. Leifeld, *Application of thermal analysis techniques in soil science*. *Geoderma*, 2009. **153**(1): p. 1-10.
- Plekhov, O., et al., *Study of strain localization and energy dissipation in metals based on infrared thermography*.
- Polakowski, H., et al., *Gradient-emissivity thermal emitter for IR camera testing and calibration*.
- Porat, B., *Digital processing of random signals: theory and methods*. 1994: Prentice-Hall, Inc.
- Porta Casanellas, J., M. López-Acevedo-Reguerín, and C. Roquero de Laburu, *Edafología: para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 1998, Mundi-Prensa, Madrid.
- Poularikas, A.D., *Handbook of formulas and tables for signal processing*. Vol. 13. 1998: CRC Press.
- Prabhu, K., *Window Functions and Their Applications in Signal Processing*. 2013: CRC Press.
- Prasad, J. and C.G.K. Nair, *Non-Destructive Test And Evaluation Of Materials*. 2008: Tata McGraw-Hill.
- Pregowski, P., et al. *Opportunities and challenges of the application of dynamic, multispectral thermography as a means of improving the effectiveness of furnace processes in the petrochemical industry*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2012. International Society for Optics and Photonics.
- Pregowski, P., et al. *Role of time and space variability of moisture and density of sand for thermal detection of buried objects: modeling and experiments*. in *AeroSense'99*. 1999. International Society for Optics and Photonics.
- Prokhorenko, P., N. Migoun, and M. Stadthaus, *Theoretical principles of liquid penetrant testing*. 1999: DVS-Verlag Berlin.

- Qi, H. and N. Diakides, *Thermal Infrared Imaging in Early Breast Cancer Detection*, in *Augmented Vision Perception in Infrared*, R. Hammoud, Editor. 2009, Springer London. p. 139-152.
- R. Hidalgo-Gato, J.R.A., J.M. López-Higuera, F.J. Madruga, *Ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja*. AEND (Asociación española de ensayos no destructivos), 2013. **62**: p. 24-35.
- Radu, T. and D. Diamond, *Comparison of soil pollution concentrations determined using AAS and portable XRF techniques*. Journal of Hazardous Materials, 2009. **171**(1-3): p. 1168-1171.
- Rajic, N., *Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures*. Composite Structures, 2002. **58**(4): p. 521-528.
- Ramirez-Granados, J.C., G. Paez, and M. Strojnik. *Dimensionless heat transfer model to compress and analyze pulsed thermography data for NDT of materials*. in *SPIE Defense and Security Symposium*. 2008. International Society for Optics and Photonics.
- Ravala, N.K., et al. *Modeling and sensing for penetration control of the saw process in the presence of welding perturbations*. in *ASME 2004 Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference*. 2004. American Society of Mechanical Engineers.
- Restrepo, A. and H. Loaliza, *New method for basic detection and characterization of flaws in composite slabs through Finite Difference Thermal Contrast (FDTC)*. J. Nondestr. Test. Ultrason, 2012. **17**(10).
- Restrepo-Girón, A.D., A.D. Restrepo-Girón, and H.L.-C. Humberto Loaliza-Correa, *3D discrete model for thermal contrast enhancement and defects depth estimation in CFRP slabs*. Revista Ingeniería y Competitividad, 2014. **16**(2): p. 143-153.
- Restrepo-Girón, A.D., *Contribución a la Solución del Problema de Detección y Caracterización de Defectos en Termografía Activa mediante Procesamiento Espacio - Temporal de Secuencias de Imágenes Infrarrojas*, in *Grupo de Investigación en Percepción y Sistemas Inteligentes*. 2014, Universidad del Valle
- Ring, E. and K. Ammer, *Infrared thermal imaging in medicine*. Physiological measurement, 2012. **33**(3): p. R33.
- Risitano, A. and G. Risitano, *Cumulative damage evaluation of steel using infrared thermography*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2010. **54**(2): p. 82-90.
- Rodríguez González, C., *Sistema automatizado de detección de defectos en piezas metálicas mediante ensayos no destructivos con ultrasonidos*. 2012: Universidad de Cantabria.
- Rositani, F., et al., *Infrared analysis of carbon blacks*. Carbon, 1987. **25**(3): p. 325-332.
- Rubeziene, V., et al., *Development of visible and near infrared camouflage textile materials*. Materials science-medziagotyra, 2009. **15**(2): p. 173-177.

- Sagaidachnyi, A., et al. *Restoration of finger blood flow oscillations by means of thermal imaging*. in *E-book Proceedings of 11-th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. 2012.
- Sakagami, T. and S. Kubo. *Determination of delamination depth in concrete structure based on inverse analysis of thermography data*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2010. International Society for Optics and Photonics.
- Sansivero, F., et al. *Campi Flegrei volcanic surveillance by thermal IR continuous monitoring*. in *11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. 2012. Department of Aerospace Engineering University of Naples Federico II.
- Satonaka, S., H. Ohba, and K. Shinozaki. *Nondestructive evaluation of weld defects by infrared thermography*. in *Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Part 5 (of 5), June 18, 1995 - June 22, 1995*. 1995. Copenhagen, Den: ASME.
- Scharstein, D. and R. Szeliski, *A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms*. International journal of computer vision, 2002. **47**(1-3): p. 7-42.
- Schrijer, F., *Investigation of Görtler vortices in a hypersonic double compression ramp flow by means of infrared thermography*. Quantitative Infrared Thermography Journal, 2010. **7**(2): p. 201-215.
- Scott, M., et al. *Passive infrared thermography as a diagnostic tool in civil engineering structural material health monitoring*. in *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III - Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2012*. 2012.
- Sendur, I.K. and B.A. Baertlein. *Numerical simulation of thermal signatures of buried mines over a diurnal cycle*. in *AeroSense 2000*. 2000. International Society for Optics and Photonics.
- Shada, A.L., et al., *Infrared thermography of cutaneous melanoma metastases*. journal of surgical research, 2013. **182**(1): p. e9-e14.
- Shahraeeni, E. and D. Or, *Thermo-evaporative fluxes from heterogeneous porous surfaces resolved by infrared thermography*. Water Resources Research, 2010. **46**(9).
- Shepard, S.M., et al., *Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequences*. Optical Engineering, 2003. **42**(5): p. 1337-1342.
- Shin, P., S. Webb, and K. Peters. *Nondestructive inspection in adhesive-bonded joint CFRP using pulsed phase thermography*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2013. International Society for Optics and Photonics.
- Shpartko, P., et al., *Thermography in manufacturing: nondestructive evaluation of ultrasonic spot welds of automotive battery pack*. 11th Quantitative InfraRed Thermography. Naples, Italy, 2012.
- Shull, P.J., *Nondestructive evaluation: theory, techniques and applications*. Dekker Mechanical Engineering, CRC Press; 1st edition, May 8, 2002.

- Siemer, U. and A. Volkswagen, *Simulation and evaluation of new thermographic techniques for the deployment in the automotive industry*. European Federation for Non-Destructive Testing, ECNDT, 2006.
- Simões, N., et al., *Active thermography evaluation of bonding defects in adhered ceramic tiling: thermal stimulation conditions and data analysis methods assessment*.
- Sivanandam, S., et al., *Medical thermography: a diagnostic approach for type 2 diabetes based on non-contact infrared thermal imaging*. *Endocrine*, 2012. **42**(2): p. 343-351.
- Smykatz-Kloss, W., *Application of differential thermal analysis in mineralogy*. *Journal of thermal analysis*, 1982. **23**(1-2): p. 15-44.
- Sophian, A., et al., *Electromagnetic and eddy current NDT: a review*. *Insight*, 2001. **43**(5): p. 302-306.
- Spisz, T.S., et al. *Processing ground-based near-infrared imagery of space shuttle re-entries*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2012. International Society for Optics and Photonics.
- Sreedhar, U., et al., *Automatic defect identification using thermal image analysis for online weld quality monitoring*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012. **212**(7): p. 1557-1566.
- Stepanić, J., et al., *Parameterisation of non-homogeneities in buried object detection by means of thermography*. *Infrared physics & technology*, 2004. **45**(3): p. 201-208.
- Stockton, G.R. *The case for using a sacrificial layer of absorbent insulation in the design of flat and low-sloped roofing*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2013. International Society for Optics and Photonics.
- Tank, V., H. Pfanzer, and H. Kick, *New remote sensing techniques for the detection and quantification of earth surface CO₂ degassing*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008. **177**(2): p. 515-524.
- Tavakoli, S., I. RANC, and D. WAGNER, *Thermal behavior study of the mold surface in HPDC process by infrared thermography and comparison with simulation*.
- Theodorakeas, P., et al. *Automated transient thermography for the inspection of CFRP structures: experimental results and developed procedures*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2011. International Society for Optics and Photonics.
- Tonković, Z., et al., *Numerical and Experimental Modeling of a T-joint Fillet Welding Process*. *TC*, 2012. **250**: p. 500.
- Toro, C., L. Arias, and S. Torres, *Characterization of a combustion process by measurements of the spatial IR radiation of the flame*.
- Udpa, S.S. and P.O. Moore, *Electromagnetic testing*. 2004: American Society for Nondestructive Testing.
- Ullmann, T., R. Aoki, and T. Schmidt. *Lock-in thermography for process integrated non-destructive evaluation of carbon fibre reinforced aircraft structures*. in *Proceedings of 10th Quantitative InfraRed Thermography conference, paper QIRT2010-140, Québec (Canada)*. 2010.

- Vahid, P.H., et al., *A Defect Detection Approach in Thermal Images*.
- Vainer, B. and V. Morozov, *Infrared thermography-based integrated approach aimed at objective evaluation of systemic vascular reactivity in humans*.
- Van De Groenendaal, H., *Thermal-imaging-and-its-applications*. EngineerIT, 2011.
- Van Hemelrijck, D. and A. Anastassopoulos, *Non Destructive Testing*. 1996: CRC Press.
- Vavilov, V., A. Chulkov, and D. Derusova. *IR thermographic characterization of low energy impact damage in carbon/carbon composite by applying optical and ultrasonic stimulation*. in *SPIE Sensing Technology+ Applications*. 2014. International Society for Optics and Photonics.
- Veenman, C.J., E.A. Hendriks, and M.J.T. Reinders. *A fast and robust point tracking algorithm*. IEEE.
- Venkatraman, B., B. Raj, and M. Menaka, *Online infrared detection of inclusions and lack of penetration during welding*. *Materials Evaluation*, 2005. **63**(9): p. 933-937.
- Venkatraman, B., et al. *Thermography for online detection of incomplete penetration and penetration depth estimation*. in *Proceedings of Asia-Pacific Conference on NDT*. 2006.
- Viscarra Rossel, R.A., et al., *Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties*. *Geoderma*, 2006. **131**(1–2): p. 59-75.
- Viviès, N., et al., *Characterization of an integrated buck converter using infrared thermography*. 2014.
- Wakankar, A., G. Suresh, and A. Ghugare. *Automatic Diagnosis of Breast Abnormality Using Digital IR Camera*. in *Electronic Systems, Signal Processing and Computing Technologies (ICESC), 2014 International Conference on*. 2014. IEEE.
- Wang, M., et al., *Thermographic visualization of leaf response in cucumber plants infected with the soil-borne pathogen Fusarium oxysporum f. sp. cucumerinum*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012. **61**: p. 153-161.
- Wang, X., et al., *Automated canopy temperature estimation via infrared thermography: a first step towards automated plant water stress monitoring*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010. **73**(1): p. 74-83.
- Waruru, B.K., et al., *Rapid estimation of soil engineering properties using diffuse reflectance near infrared spectroscopy*. *biosystems engineering*, 2014. **121**: p. 177-185.
- Washer, G., T. Brooks, and R. Saulsberry, *Condition Assessment of Kevlar Composite Materials Using Raman Spectroscopy*. 2007.
- Werschnik, H., et al., *Infrared Thermography to Study Endwall Cooling and Heat Transfer in Turbine Stator Vane Passages Using the Auxiliary Wall Method*.
- Wikle, H., et al., *Infrared sensing techniques for penetration depth control of the submerged arc welding process*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001. **113**(1): p. 228-233.

- Wurzbach, R.N., E.W. Bupp, and L.A. Williams. *Monitoring and thermal effects of relubrication of greased bearings*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2012. International Society for Optics and Photonics.
- Xu, B., *Identifying fabric structures with fast Fourier transform techniques*. Textile Research Journal, 1996. **66**(8): p. 496-506.
- Yaman, M., Y. Dilgin, and S. Gucer, *Speciation of lead in soils and relation with its concentration in fruits*. Analytica Chimica Acta, 2000. **410**(1–2): p. 119-125.
- Yang, H., *Kevlar aramid fiber*. 1993: Wiley.
- Youcef, M.L., et al. *In situ quantitative diagnosis of insulated building walls using passive infrared thermography*. in *Proceedings of the 11th international conference on quantitative infrared thermography*. Naples Italy. 2012.
- Zalameda, J.N., et al. *Thermographic imaging of the space shuttle during re-entry using a near-infrared sensor*. in *SPIE Defense, Security, and Sensing*. 2012. International Society for Optics and Photonics.
- Zalameda, J.N., N. Rajic, and W.P. Winfree. *A comparison of image processing algorithms for thermal nondestructive evaluation*. in *AeroSense 2003*. 2003. International Society for Optics and Photonics.
- Zalewski, L., et al., *Experimental and numerical characterization of thermal bridges in prefabricated building walls*. Energy Conversion and Management, 2010. **51**(12): p. 2869-2877.
- Zampella, M., et al., *Chromium and copper in micromorphological features and clay fractions of volcanic soils with andic properties*. Geoderma, 2010. **157**(3–4): p. 185-195.
- Žďárský, M., J. Valach, and D. Kytýř, *Evaluation of material's state during deformation process by means of thermographic measurement*.
- Zhang, L., et al., *Multi-Image Matching for DTM Generation from SPOT-5 HRS/HRG and IRS-P5 Imagery-For the Project of West China Topographic Mapping at 1: 50,000 Scale*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing:[sn], 2008: p. 1109-1116.
- Zhao, L. and W. Guo, *Inspection of Pseudo Kissing-bond Defects in Composite Laminate with Infrared Sensing*.
- Zilioli, E., M. Gomarasca, and R. Tomasoni, *Application of terrestrial thermography to the detection of waste-disposal sites*. Remote Sensing of Environment, 1992. **40**(2): p. 153-160.
- Zitova, B. and J. Flusser, *Image registration methods: a survey*. Image and vision computing, 2003. **21**(11): p. 977-1000.