

Tema: Imagen y Televisión

Título: Reconocimiento de objetos a partir de imágenes termográficas

Autores: Sara Bilbao Eguren

Marina Gravía García

Titulación: Ingeniería Técnica de Telecomunicación

Tutor: José Manuel Díaz López

Departamento: DIAC

Miembros del Tribunal Calificador:

Presidente: Jorge Bonache Pérez

Vocal: José Manuel Díaz López

Vocal Secretario: José Luis Rodríguez Vázquez

Fecha de Lectura: 27 de septiembre de 2012

Resumen

La termografía es un método de inspección y diagnóstico basado en la radiación infrarroja que emiten los cuerpos. Permite medir dicha radiación a distancia y sin contacto, obteniendo un termograma o imagen termográfica, objeto de estudio de este proyecto.

Todos los cuerpos que se encuentren a una cierta temperatura emiten radiación infrarroja. Sin embargo, para hacer una inspección termográfica hay que tener en cuenta la emisividad de los cuerpos, capacidad que tienen de emitir radiación, ya que ésta no sólo depende de la temperatura del cuerpo, sino también de sus características superficiales.

Las herramientas necesarias para conseguir un termograma son principalmente una cámara termográfica y un software que permita su análisis. La cámara percibe la emisión infrarroja de un objeto y lo convierte en una imagen visible, originalmente monocromática. Sin embargo, después es coloreada por la propia cámara o por un software para una interpretación más fácil del termograma.

Para obtener estas imágenes termográficas existen varias técnicas, que se diferencian en cómo la energía calorífica se transfiere al cuerpo. Estas técnicas se clasifican en termografía pasiva, activa y vibrotermografía. El método que se utiliza en cada caso depende de las características térmicas del cuerpo, del tipo de defecto a localizar o la resolución espacial de las imágenes, entre otros factores.

Para analizar las imágenes y así obtener diagnósticos y detectar defectos, es importante la precisión. Por ello existe un procesado de las imágenes, para minimizar los efectos provocados por causas externas, mejorar la calidad de la imagen y extraer información de las inspecciones realizadas.

La termografía es un método de ensayo no destructivo muy flexible y que ofrece muchas ventajas. Por esta razón el campo de aplicación es muy amplio, abarcando desde aplicaciones industriales hasta investigación y desarrollo. Vigilancia y seguridad, ahorro energético, medicina o medio ambiente, son algunos de los campos donde la termografía aporta importantes beneficios.

Este proyecto es un estudio teórico de la termografía, donde se describen detalladamente cada uno de los aspectos mencionados. Concluye con una aplicación práctica, creando una cámara infrarroja a partir de una webcam, y realizando un análisis de las imágenes obtenidas con ella. Con esto se demuestran algunas de las teorías explicadas, así como la posibilidad de reconocer objetos mediante la termografía.

Abstract

Thermography is a method of testing and diagnosis based on the infrared radiation emitted by bodies. It allows to measure this radiation from a distance and with no contact, getting a thermogram or thermal image, object of study of this project.

All bodies that are at a certain temperature emit infrared radiation. However, making a thermographic inspection must take into account the emissivity of the body, capability of emitting radiation. This not only depends on the temperature of the body, but also on its surface characteristics.

The tools needed to get a thermogram are mainly a thermal imaging camera and software that allows analysis. The camera sees the infrared emission of an object and converts it into a visible image, originally monochrome. However, after it is colored by the camera or software for easier interpretation of thermogram.

To obtain these thermal images it exists various techniques, which differ in how heat energy is transferred to the body. These techniques are classified into passive thermography, active and vibrotermografía. The method used in each case depends on the thermal characteristics of the body, the type of defect to locate or spatial resolution of images, among other factors.

To analyze the images and obtain diagnoses and defects, accuracy is important. Thus there is a image processing to minimize the effects caused by external causes, improving image quality and extract information from inspections.

Thermography is a non-destructive test method very flexible and offers many advantages. So the scope is very wide, ranging from industrial applications to research and development. Surveillance and security, energy saving, environmental or medicine are some of the areas where thermography provides significant benefits.

This project is a theoretical study of thermography, which describes in detail each of these aspects. It concludes with a practical application, creating an infrared camera from a webcam, and making an analysis of the images obtained with it. This will demonstrate some of the theories explained as well as the ability to recognize objects by thermography.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento al departamento de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones, por ofrecernos este proyecto, y a nuestro tutor, José Manuel Díaz, por confiar en nosotras y ayudarnos a realizarlo. También a todos nuestros profesores de la universidad de los que hemos aprendido tanto en estos años

Ante todo quisiera agradecer la confianza, el apoyo y aliento a mis padres, sin vosotros esta carrera no hubiera sido posible. A mi hermano por ser mitad padre, mitad amigo y a mi hermana por aguantarme y ayudarme todos estos años.

A las amigas que encontré en Madrid, Beatriz, Patricia y Alba, por hacer que tuviese aquí otra familia y conseguir que me sintiese menos sola.

A mis amig@s de toda la vida, César, Vanesa, Laura, Verna, Carol, Pablo,... Porque a pesar del tiempo y la distancia seguís estando ahí.

Y cómo no... Marina, gracias por estos años. Por los buenos y malos momentos, por tu ayuda durante toda la carrera. No podría haber encontrado a una compañera y amiga mejor.

Sara

En primer lugar quisiera agradecer a mi familia, en especial a mis padres, por su apoyo y paciencia, por confiar en mí siempre y darme la oportunidad de estudiar esta carrera.

A mis amigas, por estar siempre ahí, compartiendo los buenos y malos momentos, y haciendo más fáciles todos estos años: Beatriz, Patricia, Alba... y en especial Sara, amiga y compañera inseparable de carrera y de proyecto.

Y a Flo, por creer en mí y ser en los últimos años mi gran apoyo y principal motivación para terminar este proyecto, y por fin, la carrera.

Marina

Tabla de Contenido

Lista de Figuras	9
Índice de Tablas	14
Capítulo 1 Introducción.....	15
Capítulo 2 Estado del Arte.....	17
1. Historia de la Termografía	17
2. Espectro electromagnético	19
3. Imágenes infrarrojas Vs Imágenes de espectro visible	20
3.1. El espectro visible	20
3.2. El espectro electromagnético	20
3.3. El espectro visible Vs El espectro electromagnético	21
4. Fundamentos de la Termografía	22
4.1. Radiación infrarroja	23
4.2. Emisividad	25
5. Aplicaciones de la termografía	27
Capítulo 3 Obtención de Imágenes Termográficas.....	29
1. Procedimientos de obtención	29
1.1. Termografía pasiva	30
1.2. Termografía activa.....	30
1.2.1. Termografía Activa Pulsada (PT)	31
1.2.2. Lock-in (LT)	32
1.2.3. Pulso Largo (ST)	33
1.2.4. Fase Pulsada	34
1.3. Vibrotermografía	34
2. Hardware y software asociado	35
2.1. Cámaras Termográficas	35
2.1.1. Cámaras con detectores criogenizados	36

2.1.2.	Cámaras con detectores al ambiente	36
2.1.3.	Cámaras infrarrojas activas.....	37
2.1.4.	Cámaras infrarrojas pasivas.....	37
2.1.5.	Otros tipos de cámaras	37
2.2.	Funcionamiento de una cámara termográfica.....	38
2.2.1.	Sistema óptico.....	39
2.2.2.	Detectores térmicos	39
2.2.3.	Mecanismo de escáner (barrido).....	41
2.2.4.	Procesado de señal	42
2.2.5.	Monitor.....	43
2.2.6.	Resolución espacial	43
2.2.7.	Preparación del equipo	44
2.2.8.	Parámetros que se deben controlar	44
2.2.9.	Normas y cualificación.....	45
2.2.10.	Cámaras comerciales y su software.....	45
2.2.11.	Otros equipos.....	50
Capítulo 4 Análisis de Imágenes Termográficas		57
1.	Preprocesado de Imágenes Termográficas.....	57
1.1.	Píxeles defectuosos (badpixels).....	58
1.2.	Ruido de Patrón Fijo (FPN).....	58
1.3.	Encuadre (vignetting)	59
1.4.	Calibración de temperatura.....	59
1.5.	Reducción de ruido.....	60
2.	Procesado.....	61
2.1.	Métodos de contraste térmico	61
2.1.1.	Contraste térmico clásico	61
2.1.2.	Contraste Absoluto Diferencial.....	62
2.1.3.	CAD modificado por cuádruplos térmicos	63

2.2.	Termografía de fase pulsada	66
2.3.	Reconstrucción de señales termográficas	68
2.4.	Termografía de componentes principales	70
2.5.	Redes neuronales artificiales.....	70
3.	Post-Procesado.....	72
3.1.	Algoritmos de detección de defectos	72
3.2.	Métodos de inversión de la profundidad	73
3.2.1.	Contraste térmico.....	73
3.2.2.	Frecuencia límite	73
3.2.3.	Modelos estadísticos.....	75
3.2.4.	Defectos de tamaño	75
Capítulo 5 Usos y Aplicaciones de la Termografía		77
1.	Aplicaciones de la Termografía en Edificios	82
1.1.	Objetivos	84
1.2.	Factores que afectan a la medida.....	85
1.3.	Metodología	85
1.4.	Identificación de defectos	88
1.4.1.	Aislamiento (puentes térmicos y deficiencias de aislamiento).....	88
1.4.2.	Fugas de calor e infiltraciones de aire.....	89
1.4.3.	Detección de humedades y daños por agua.	91
1.4.4.	Detección de materiales y estructuras.....	91
2.	Termografía en Aplicaciones Ambientales	92
2.1.	Localización de áreas de acumulación de desechos antiguos.....	92
2.2.	Localización de tanques bajo tierra en zonas industriales	93
2.3.	Detección de incendios forestales	94
2.3.1.	Descripción del sistema	94
2.4.	Control de la Calidad del Aire	96
2.5.	Otras Aplicaciones Ambientales	97
3.	Termografía en Energía Eólica	98
3.1.	Aerogeneradores.....	98
3.2.	Objetivos	100

3.3.	Metodología	101
3.3.1.	Inspección termográfica de las palas del rotor	101
3.3.2.	Identificación de los defectos	103
4.	Termografía en energía Solar	106
4.1.	Instalaciones fotovoltaicas	107
4.2.	Paneles fotovoltaicos.....	107
4.3.	Objetivos	109
4.4.	Metodología	109
4.4.1.	Inspección de Paneles Solares	109
4.4.2.	Otros elementos a inspeccionar	111
4.5.	Identificación de defectos	111
4.6.	Importancia de la termografía en la Energía Solar	113
5.	Termografía en Aplicaciones Aéreas	113
5.1.	Metodología	113
5.1.1.	Trazamiento de Mapas Térmicos, Orto-rectificación y Procesamiento Posterior	114
5.2.	Objetivos	115
5.2.1.	Pérdidas en cañerías de vapor	116
5.2.2.	Aviones	117
5.2.3.	Misiones de búsqueda y rescate.....	118
6.	Termografía en Medicina	118
6.1.	Objetivos	119
6.1.1.	Cáncer de Mama.....	120
6.1.2.	Veterinaria.....	121
6.1.3.	Inflamación.....	122
6.1.4.	Lesiones musculares.....	123
6.1.5.	Lesiones nerviosas.....	123
6.1.6.	Medicina preventiva	123
6.1.7.	SARS.....	123

7.	Termografía en Industria	124
7.1.	Termografía en instalaciones mecánicas	125
7.2.	Termografía en sistemas de distribución eléctrica	127
7.2.1.	Fallos en sistemas de distribución eléctrica.....	128
7.2.2.	Tipos de inspecciones	129
7.2.3.	Sistemas de distribución eléctrica	130
7.3.	Otras áreas de aplicación en el mantenimiento industrial	138
7.4.	Ventajas del mantenimiento preventivo con termografía.....	139
8.	Otras Aplicaciones	139
8.1.	Termografía en automóviles.....	139
8.2.	Termografía en la agricultura y geología	141
8.3.	Termografía en el arte y la restauración.....	143
8.4.	Fotografía infrarroja	144
8.4.1.	Fotografía digital	145
Capítulo 6 Aplicación Práctica		147
1.	Objetivo.....	147
2.	Desarrollo de la Práctica.....	148
2.1.	Construcción de la Cámara Infrarroja	149
2.2.	Software	150
2.3.	Análisis de las imágenes	151
Capítulo 7 Conclusiones		155
Bibliografía		157
Artículos consultados		157
Páginas Web.....		159
Anexo A.....		163
1.	Tabla de emisividad de diferentes materiales	164

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama del espectro electromagnético, mostrando el tipo, longitud de onda (con ejemplos), frecuencia y la temperatura de emisión de cuerpo negro	19
Figura 2. Espectro electromagnético	20
Figura 3. Fotografía de espectro visible (izquierda), fotografía infrarroja (izquierda)	21
Figura 4. Fotografía de la luz visible (izquierda) y fotografía infrarroja (derecha)	23
Figura 5. Espectro Infrarrojo	24
Figura 6. Distribución de energía emitida por un cuerpo a distintas temperaturas	24
Figura 7: Representación esquemática de termografía activa pulsada	32
Figura 8. Representación esquemática de lock-in	33
Figura 9. Representación esquemática de vibrotermografía	35
Figura 10. Esquema detallado del proceso de captación de imágenes infrarrojas..	38
Figura 11. Camino de una señal infrarroja en un sistema de captación de imágenes infrarrojas	39
Figura 12: Mecanismo de escáner	41
Figura 13: Procesado de señal en una cámara termográfica moderna	42
Figura 14. Resolución espacial	43
Figura 15: Relación entre el tamaño de los objetos y la distancia a la cámara	44
Figura 16. Cámaras de la serie SC5000	49
Figura 17. Escáner RAYTEC	51
Figura 18. Sistema Thermo Scope	52
Figura 19. Captura del interfaz del SW controlador de un microscopio infrarrojo	53
Figura 20. Microscopio infrarrojo	54

Figura 21 (a) Placa de acero con 25 inclusiones de Teflon de diferentes tamaños y en varias posiciones; (b) termograma inicial tomado 209ms después del pulso de calor; (c) ruido de patrón fijo; (d) badpixels y vignetting; (e) curva de calibración de temperatura; (f) termograma en (b) con corrección de ruido de patrón fijo, badpixels y vignetting y calibrado en temperatura	60
Figura 22. (a)Termograma sin filtrar; (b) termograma después de aplicarle un filtro Gaussiano: perfiles espaciales de los defectos (arriba), diagramas de fase (en medio) y resultados de segmentación usando el método de Canny para detección de bordes	61
Figura 23. Curvas de temperatura y contraste térmico entre un área defectuosa y un área no defectuosa	62
Figura 24. Curvas CAD clásico de los defectos de 15 mm de diámetro en la muestra PRC006.....	63
Figura 25. Placa finita de material compuesto sometida a un impulso térmico delta de Dirac	64
Figura 26. Curvas de CAD modificado de los defectos de 15 mm de diámetro en la muestra PFRC006.....	66
Figura 27. c) muestra una imagen de fase, o fasegrama, obtenida al aplicar la PPT a la secuencia corregida como en a). Como puede observarse, se logra una mejora considerable del contraste entre zonas sanas y defectuosas gracias a la utilización de la fase. Además, puede alcanzarse una mejora de contraste aún más notable al utilizar el algoritmo PPT con datos sintéticos de entrada en vez de datos brutos..	68
Figura 28. Evolución de temperatura en el dominio logarítmico en una muestra de compuesto (PFRC) con inserciones de Teflon a diferentes profundidades y con diferentes tamaños	69
Figura 29. (a) Configuración detectora de defectos (b) Configuración estimadora de profundidad	71
Figura 30. Curvas de evolución de la fase para diferentes regiones defectuosas	74
Figura 31: Ventana sin sellar	78
Figura 32: Tejado plano con filtración	78

Figura 33: Calentador de gas construido muy cerca de la pared (riesgo de incendio)	79
Figura 34: Células fotovoltaicas defectuosas en una placa solar	80
Figura 35: Informe vascular	81
Figura 36. Termograma de la fachada de un edificio	83
Figura 37. Termograma de la fachada de un edificio	88
Figura 38. Termograma de un falso techo	88
Figura 39. Claraboyas en la zona de la cubierta. Las columnas o pilares de muchos edificios pueden ser fuentes importantes de pérdidas de calor, y por ello se deberá poner especial cuidado a la hora del diseño y en la selección de los materiales.	89
Figura 40. Infiltraciones de aire frío en una vivienda	90
Figura 41. Termograma de una puerta	90
Figura 42. Pérdidas a través del tubo de canalización.	91
Figura 43. Termograma de un techo con humedad	91
Figura 44. Termogramas de dos viviendas diferentes	92
Figura 45. Tanque subterráneo de almacenamiento	93
Figura 46. Sistema de vigilancia	95
Figura 47. Imagen aérea de un terreno con peligro de incendio	96
Figura 48. Aerogenerador de eje horizontal	99
Figura 49. Aerogenerador de eje horizontal	100
Figura 50. Turbina eólica	101
Figura 51. Inspección pasiva de la parte interna de la parte interna de una pala de rotor con una cámara termográfica (izq.). Imagen termográfica de la parte interna de la pala del rotor (arriba dcha.). Defectos del encolado observados desde el exterior (abajo dcha.)	103
Figura 52. Imagen térmica de una pala de rotor mientras se está moviendo. Las partes de mayor brillo son las partes más calientes y muestran la acumulación de calor debido a las cargas mecánicas (flechas azules). En la imagen de la derecha las	

partes de mayor brillo indican delaminaciones producidas por el calor producido por la fricción de las micro-grietas (flechas rojas).....	104
Figura 53. Sistema de termografía activa sobre raíles para la inspección de estructuras largas (izq.). Defectos de delaminado por filtraciones de aire en la fibra de vidrio (dcha.).....	105
Figura 54. Sistema de pruebas de laboratorio sobre una cinta transportadora (izq.). Imagen térmica de una muestra de prueba que muestra delaminaciones en los puntos con más brillo (dcha.).....	106
Figura 55. Instalación fotovoltaica.....	107
Figura 56. Panel fotovoltaico	108
Figura 57 Célula irradiada por el sol (Izq.) Célula no irradiada o en fallo (Dcha.)	108
Figura 58. Punto caliente en la misma posición de módulos diferentes.....	112
Figura 59. Célula sobrecalentada.....	112
Figura 60. Serie sobrecalentada	112
Figura 61. Mosaico de imagen infrarroja (geo-TIFF) de una universidad pequeña.	115
Figura 62. Imagen infrarroja e imagen visual de un sistema de vapor de agua con fuga coloreada en rojo.....	117
Figura 63.....	120
Figura 64. Examen termográfico.....	121
Figura 65. Motor con un calentamiento excesivo	125
Figura 66. Termografía de suelo radiante	127
Figura 67. Inspección cualitativa.	129
Figura 68. Termografía obtenida desde el suelo	132
Figura 69. Elementos de suspensión en una torre de alta tensión (izq.) Elementos en una torre de paso aéreo a tierra (dcha.)	132
Figura 70. Punto caliente de un seccionador (izq.).Conexiones de un transformador	135

Figura 71. Seccionadores en un centro de transformación	137
Figura 72. Sistema de visión nocturna de un coche	140
Figura 73. Imagen de un sistema de visión nocturna de un coche	140
Figura 74. UAV VTOL	141
Figura 75. Imagen infrarroja de una plantas.....	141
Figura 76. Termograma de una erupción volcánica	142
Figura 77. Los Desposorios que pintó Goya, la escena del conjunto pictórico de Aula Dei que presenta más daños. Arriba, el detalle de una de las grietas de la pintura.	144
Figura 78. Fotografía infrarroja de Simon Marsden.....	145
Figura 79.....	146
Figura 80. Filtro IR Hoya R72	148
Figura 81. Función de transferencia del filtro Hoya R72	148
Figura 82. Cámara web Logitech.....	149
Figura 83. Interior de la cámara web (izq.) y filtro IR (dcha.)	150
Figura 84. Fotografía infrarroja (izq.) y termograma (dcha.) de un mando a distancia.....	150
Figura 85. Captura de pantalla del software MikroView.....	151
Figura 86. Fotografía (izq.) y termograma (dcha.) de una mesa de madera y cristal.	151
Figura 88. Fotografía (izq.) y termograma (dcha.) de dos camisetas de diferente color	152
Figura 87. Fotografía (izq.) y termograma (dcha.) de una camiseta	152
Figura 89. Fotografía (izq.) y termograma (dcha.) de dos espátulas iguales a diferentes temperaturas.	153
Figura 90. Fotografía (izq.) y termograma (dcha.) de una botella fría y un cargador caliente	153

Índice de Tablas

Tabla 1: Características principales de diferentes tipos de detectores	40
Tabla 2. Especificaciones técnicas de la cámara Thermo Tracer H2630.....	46
Tabla 3. Especificaciones técnicas de la cámara TS 9100	46
Tabla 4: Especificaciones técnicas de la cámara FLIR i5/i7	48
Tabla 5: Especificaciones técnicas de la cámara SC5000	49
Tabla 6. Emisividades de diferentes materiales	164

Capítulo 1 Introducción

El objetivo principal de este proyecto es el estudio teórico de las imágenes termográficas. Para ello se estudian las técnicas y herramientas que se utilizan para la obtención de dichas imágenes, su procesado, análisis posterior, y sus aplicaciones.

El proyecto va a constar de siete capítulos. Se partirá del estado del arte, que consistirá en una visión general de la termografía desde su base. Se comenzará con un breve resumen de la historia de la termografía. A continuación se explicarán los fundamentos de la termografía, y se dará una noción de los usos y aplicaciones de ésta.

En el capítulo tres se hará una descripción y clasificación de los diferentes procedimientos de obtención de imágenes termográficas, además de presentar el hardware y software que se utiliza, y su funcionamiento.

En el cuarto capítulo se tratará el procesado de las imágenes, dividido en tres pasos: pre-procesado, procesado y post-procesado. Para esto existen diferentes métodos de tratamiento digital, y se estudiarán todos en este capítulo.

El quinto capítulo ofrecerá una visión general de las aplicaciones de la termografía. A continuación se profundizará en algunas de ellas, obteniendo así una idea más clara de cómo se aplica esta técnica en diferentes campos.

En el sexto capítulo se presentará la experiencia práctica realizada a partir de una cámara, un filtro infrarrojo y un software de análisis de imágenes termográficas.

Para finalizar, en el capítulo séptimo, se analizarán las conclusiones a las que se han llegado con la realización del presente proyecto.

Capítulo 2 Estado del Arte

1. Historia de la Termografía

En el año 1800 el astrónomo alemán Frederick William Herschel descubre la existencia de la radiación infrarroja. Herschel colocó un termómetro de mercurio en el espectro obtenido por un prisma de cristal con el fin de medir el calor emitido por cada color. Descubrió que el calor era más fuerte al lado del rojo del espectro y observó que allí no había luz. Herschel deduce de manera correcta a partir de este hecho que se trata de una manifestación de una luz invisible por completo para el ojo humano.

A continuación denomina a esta luz “ultrarroja”, es decir situada más allá del rojo. Y a la radiación "rayos calóricos", denominación bastante popular a lo largo del siglo XIX que, finalmente, fue dando paso al más moderno de radiación infrarroja. El nombre de infrarroja se refiere a la frecuencia de dicha luz. La frecuencia de la luz es menor cuanto más se avanza a lo largo de la totalidad del espectro de la luz visible desde el extremo violeta del rojo.

A mediados del siglo XX se desarrollaron los primeros sistemas infrarrojos para la medición de dicha radiación. Compuestos de varias unidades modulares de gran tamaño que formaban conjuntos pesados y difíciles de manejar. El elemento sensor era una aleación de diferentes elementos que por efecto fotoeléctrico producían una señal eléctrica al incidir la radiación infrarroja sobre él. El inconveniente que tenía esta técnica era que el sensor se calentaba y se necesitaba un sistema paralelo de refrigeración. Por esto, las primeras cámaras eran pesadas, grandes y poco manejables.

Sobre la década de los ochenta apareció otra tecnología que revolucionó el mundo de la medida de temperatura sin contacto. Se desarrollaron los sensores de efecto térmico o también llamados microbolómetros. Estos a diferencia de los anteriores utilizaban el efecto térmico de la radiación infrarroja para variar las condiciones eléctricas de una microresistencia, compuesta por un material semiconductor, y así obtener una señal proporcional a la potencia del infrarrojo recibido. Esta tecnología ya no necesitaba ningún tipo de refrigeración y por tanto se pudo reducir de manera asombrosa el tamaño y el peso de los sistemas termográficos.

Muchos avances técnicos, un progreso importante en el campo de la tecnología informática y la llegada de la era digital en la mitad de los 90s provocaron la rápida evolución de las cámaras. La posibilidad de adquirir instrumentos de elevadas prestaciones a un precio cada vez más barato permitieron a la termografía acceder a un espectro muy amplio de aplicaciones civiles, convirtiéndose en una técnica indispensable consolidada en todo el mundo.

2. Espectro electromagnético

Toda materia emite o absorbe radiación electromagnética, que es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes. Estos campos se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro. Dicha radiación sirve para identificar la materia.

La distribución energética del conjunto de las ondas que producen los campos electromagnéticos se denomina espectro electromagnético. Para su estudio, éste se divide en segmentos o bandas en función de la longitud de onda. Los rayos gamma, rayos X, ultravioleta, luz visible, infrarrojo, microondas y radiofrecuencia son las bandas en las que queda dividido. En la Figura 1 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se representa un diagrama del espectro electromagnético, mostrando el tipo, longitud de onda (con ejemplos), frecuencia y la temperatura de emisión de cuerpo negro.

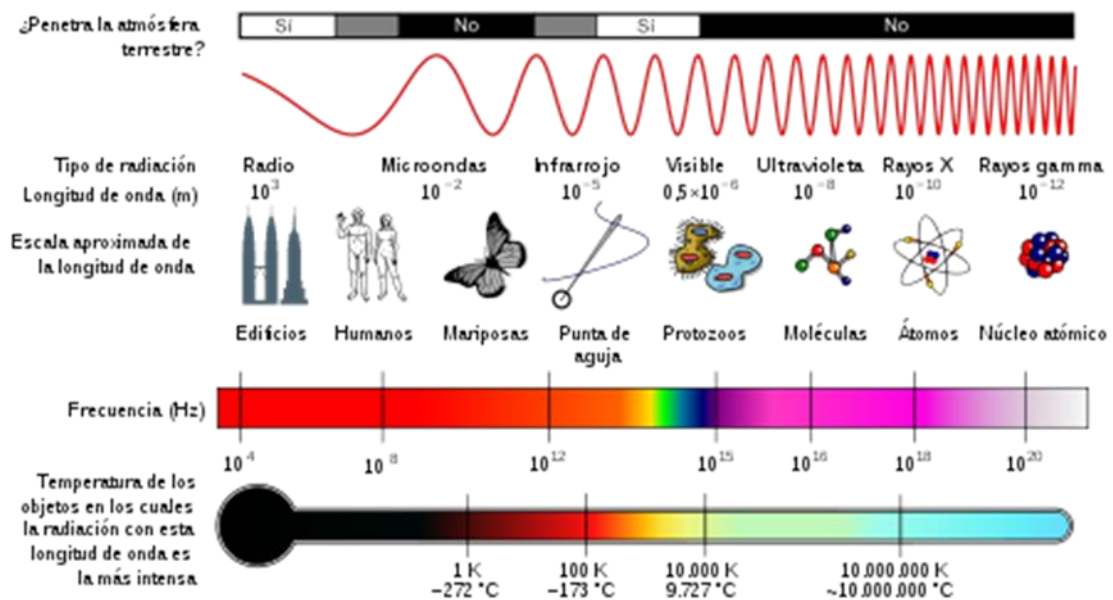


Figura 1. Diagrama del espectro electromagnético, mostrando el tipo, longitud de onda (con ejemplos), frecuencia y la temperatura de emisión de cuerpo negro

Como ya se ha mencionado, dentro de este espectro electromagnético se encuentran los dos tipos de radiación que nos interesan, la luz visible, la única que el ser humano puede percibir, y la radiación infrarroja, relacionada directamente con la termografía, siendo su base fundamental. Por ello, a continuación se van a estudiar y comparar dichas radiaciones.

3. Imágenes infrarrojas Vs Imágenes de espectro visible

3.1.El espectro visible

Se denomina espectro visible a la región del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir. A la radiación electromagnética en este rango de longitudes de onda se le llama luz visible o simplemente luz. No hay límites exactos en el espectro visible; un típico ojo humano responderá a longitudes de onda desde 400 a 700 nm aunque algunas personas pueden ser capaces de percibir longitudes de onda desde 380 a 780 nm.

3.2.El espectro electromagnético

La radiación infrarroja, radiación térmica o radiación IR es un tipo de radiación electromagnética de mayor longitud de onda que la luz visible, pero menor que la de las microondas. El nombre de infrarrojo significa por debajo del rojo pues su comienzo se encuentra adyacente al color rojo del espectro visible. Consecuentemente, tiene menor frecuencia que la luz visible y mayor que las microondas. Su rango de longitudes de onda va desde unos 0,7 hasta los 300 micrómetros. La radiación infrarroja es emitida por cualquier cuerpo cuya temperatura sea mayor que 0 Kelvin, es decir, $-273,15$ grados Celsius (cero absoluto).

En la Figura 2 se muestra el espectro electromagnético. En él vemos la región ocupada tanto por el espectro visible como por el infrarrojo.

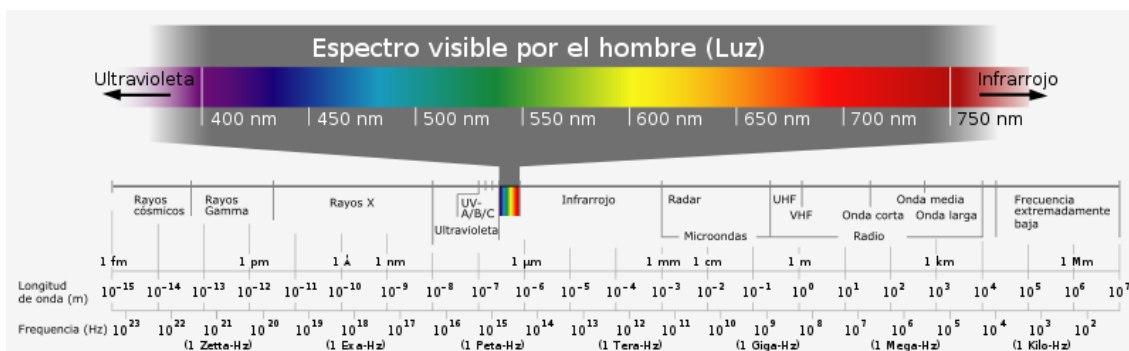


Figura 2. Espectro electromagnético

3.3.El espectro visible Vs El espectro electromagnético

Cómo podemos suponer de lo anterior, las imágenes en el dominio infrarrojo capturan un tipo de información muy diferente de las imágenes en el espectro visible. Si en el espectro visible la imagen de un objeto depende de la cantidad de luz que incide en su superficie y lo bien que la refleja, en el dominio infrarrojo, la imagen de un objeto está relacionada con su temperatura y la cantidad de calor que emite. En las siguientes fotografías (Figura 3) se puede observar esta diferencia.



Figura 3. Fotografía de espectro visible (izquierda), fotografía infrarroja (izquierda)

En el espectro visible se capta el color, ofreciendo una información más rica. Los límites de los objetos están bien definidos debido a que el contraste con el fondo es bueno. Por contraposición las imágenes infrarrojas resultan borrosas, tienen una peor resolución y un contraste entre fondo y objeto más bajo. Además las imágenes de espectro visible ofrecen mayor resolución.

Por otro lado las imágenes de espectro visible son altamente sensibles a los cambios de iluminación mientras que a las infrarrojas no les afectan tanto. Los niveles de intensidad en una imagen de infrarrojos son representativos de la temperatura de las superficies de los objetos. Además son menos sensibles al ruido, debido a la casi total ausencia de sombras y texturas que se originan cuando existen colores. Aunque las condiciones del tiempo, como por ejemplo, la lluvia o una niebla pesada, pueden modificar la firma termal de los cuerpos, limitando la efectividad de los sistemas de infrarrojos.

Es obvio, que la utilización bien de imágenes de espectro visible, bien de las infrarrojas, dependerá de la información que queramos extraer de las imágenes.

Debido a lo general que resulta la termografía infrarroja, el campo de aplicación de esta tiene una extensión que va más lejos de la simple toma de medidas de temperatura, y abarca tanto aplicaciones industriales como de investigación y desarrollo.

La localización de defectos en instalaciones eléctricas, el análisis de delaminaciones de materiales compuestos, el control de procesos de fabricación, la vigilancia en condiciones nocturnas o de visibilidad reducida, la detección de pérdidas energéticas en edificación y hornos, o el estudio de dispositivos mecánicos... son algunos ejemplos en los que se pueden obtener importantes beneficios mediante el uso de la termografía infrarroja.

4. Fundamentos de la Termografía

La termografía es un método de inspección que permite la medición de la temperatura radiada por un cuerpo desde una cierta distancia y sin contacto. Con esta técnica se obtiene un mapa térmico de la superficie de los cuerpos, llamado termograma.

La termografía infrarroja utiliza la radiación emitida por cualquier cuerpo que se encuentre a una temperatura superior al cero absoluto. La longitud de onda de dicha radiación depende de la temperatura del cuerpo.

La Figura 4 muestra una fotografía a la luz visible (izquierda) y una fotografía infrarroja (derecha) de dos vasos. Un vaso contiene agua fría mientras que el otro contiene agua caliente. En la fotografía a la luz visible no podemos decir solamente mirando cuál vaso contiene agua fría y cuál agua caliente. En la imagen infrarroja podemos claramente "observar" la brillantez del agua caliente en el vaso de la izquierda y el agua más oscura y fría en el vaso de la derecha.

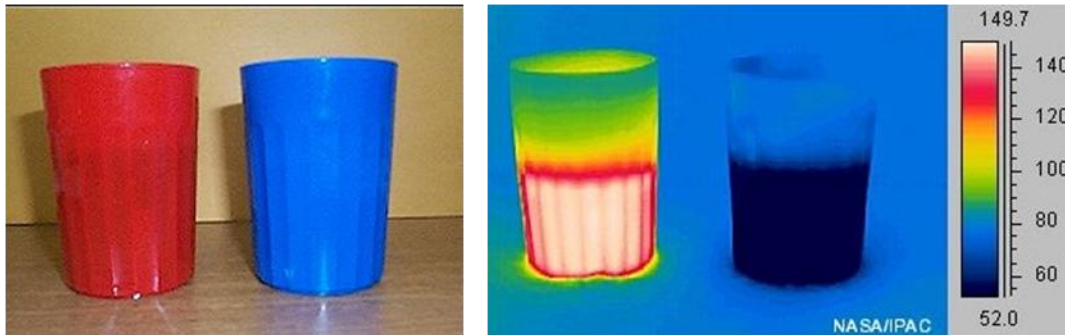


Figura 4. Fotografía de la luz visible (izquierda) y fotografía infrarroja (derecha)

Cuando el flujo de calor en un cuerpo presenta alteraciones y anomalías, provoca contrastes de temperatura en su superficie. Estos patrones térmicos, reconocibles a simple vista o por medio del procesamiento de la imagen, se obtienen y analizan mediante la termografía y permiten la identificación de fallos en tiempo real.

La termografía se puede aplicar en cualquier área donde el problema u objetivo esté relacionado con una variación de temperatura.

4.1. Radiación infrarroja

Todos los cuerpos que se encuentren a una temperatura por encima del cero absoluto (0K,-273°C), emiten energía infrarroja.

La radiación infrarroja es una forma de radiación electromagnética, al igual que los rayos X, ultravioleta o radio. El conjunto de todas las formas de radiación electromagnética dan lugar al espectro electromagnético.

La Figura 5 muestra el dicho espectro, con las diferentes regiones de radiación. Todas ellas emiten energía en forma de onda electromagnética y viajan a la velocidad de la luz. La diferencia entre ellas es, como se puede observar en la figura, su longitud de onda, relacionada con la frecuencia.

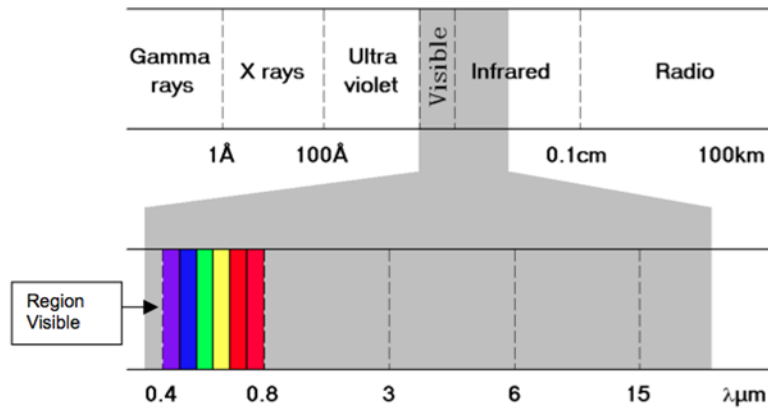


Figura 5. Espectro Infrarrojo

El ojo humano responde a la luz visible en el rango de 0.4 a 0.75 micras. La radiación infrarroja tiene una longitud de onda mayor que la luz visible, pero menor que las microondas, y está comprendida entre $0,7 \mu\text{m}$ y $1000 \mu\text{m}$. Los rayos infrarrojos se dividen en cortos ($0,7\text{-}5\mu\text{m}$), medios ($5\text{-}30\mu\text{m}$) y largos ($30\text{-}1000\mu\text{m}$), en función de la proximidad de la longitud de onda a la luz visible.

La Figura 6 se muestra la distribución de energía emitida por un cuerpo a distintas temperaturas. Como puede observarse a mayor temperatura mayor es el pico de energía. La longitud de onda a la que ocurre el pico de energía se vuelve progresivamente más corta a medida que se incrementa la temperatura. A bajas temperaturas el pico de energía se produce en longitud de onda larga.

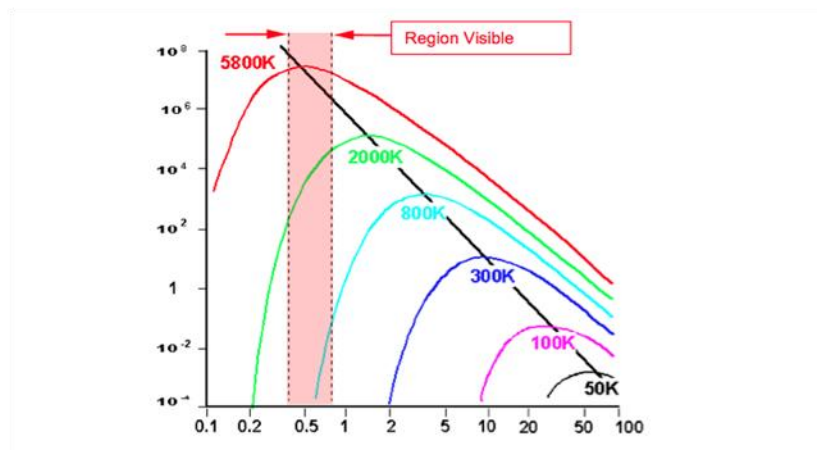


Figura 6. Distribución de energía emitida por un cuerpo a distintas temperaturas

4.2. Emisividad

La intensidad de la radiación infrarroja es función de la temperatura, pero también depende de las características superficiales del objeto, el color y el tipo de material. Esto se debe a que cada material, dependiendo de sus características, tiene una capacidad distinta de emitir energía infrarroja. La expresión de dicha capacidad se denomina emisividad.

Un objeto que emite el máximo posible de energía para su temperatura se conoce como Cuerpo Negro. En la práctica las superficies emiten menos energía que un Cuerpo Negro, ya que éstos no existen.

La emisividad de un objeto se define como el cociente entre la radiación emitida por un objeto a una temperatura determinada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura.

Los valores de emisividad varían de un material a otro en función de características como la textura de su superficie, o la reflectividad. Un material altamente reflectante es un pobre emisor de energía infrarroja, por lo que tiene un valor de emisividad bajo. Sin embargo, para un objeto opaco sucede lo contrario.

Un objeto de baja emisividad con la misma temperatura que otro de alta emisividad parecería más frío visualmente. Esto produciría un error en la medida de temperatura, la cual no puede determinarse midiendo la energía infrarroja que emite, sino que también debe conocerse el valor de emisividad del objeto.

A continuación se muestra una tabla con valores de emisividad de distintos materiales.

Tabla 1. Valores de emisividad de distintos materiales

Material	Emisividad
Acero brillante	0.18
Acero oxidado	0.85
Latón brillante	0.10
Latón oxidado	0.61
Aluminio brillante	0.05
Aluminio oxidado	0.30
Cemento	0.90
Asfalto	0.90
Ladrillo Rojo	0.93
Grafito	0.85
Cloth	0.85

Existen distintas formas de obtener el valor de emisividad de un objeto:

- 1) Consultar manuales de los fabricantes (asegurarse que han sido evaluados a la longitud de onda de trabajo de su Cámara de Termografía, ya que la emisividad puede variar con la longitud de onda).
- 2) Evaluar la emisividad del objeto mediante un método de laboratorio.

Hay dos métodos principales para solucionar el problema de la emisividad.

- a) Corregir matemáticamente el valor de temperatura medido. Generalmente se realiza en la señal del procesador de la Cámara de Termografía. La mayoría de las cámaras actuales tienen un ajuste de compensación que el operador puede ajustar.
- b) Podría pintarse la superficie de un objeto de baja emisividad con un recubrimiento de emisividad alta y constante. Esto permite elevar el valor de emisividad, pero no siempre es posible.

Cuando se realizan las inspecciones termográficas, los fallos generalmente se identifican por comparación de temperatura de los componentes similares en las

mismas condiciones. Es una alternativa muy precisa para predecir la emisividad de cada componente y obtener unos valores de temperatura absolutas.

5. Aplicaciones de la termografía

Debido a lo general que resulta la termografía infrarroja, el campo de aplicación de esta tiene una extensión que va más lejos de la simple toma de medidas de temperatura, y abarca tanto aplicaciones industriales como de investigación y desarrollo.

La localización de defectos en instalaciones eléctricas, el análisis de delaminaciones de materiales compuestos, el control de procesos de fabricación, la vigilancia en condiciones nocturnas o de visibilidad reducida, la detección de pérdidas energéticas en edificación y hornos, o el estudio de dispositivos mecánicos... son algunos ejemplos en los que se pueden obtener importantes beneficios mediante el uso de la termografía infrarroja.

Capítulo 3 Obtención de Imágenes Termográficas

1. Procedimientos de obtención

Como ya se ha explicado la termografía es un método de ensayo no destructivo que permite detectar y medir variaciones de temperatura emitidas por un cuerpo, transformándolas en imágenes visibles. El tema que nos ocupa ahora es la obtención de dichas imágenes.

Existen varias técnicas para detectar fallos utilizando termografía infrarroja. La diferencia entre los métodos se basa, principalmente, en cómo la energía calorífica

se transfiere al componente en cuestión. Estos métodos se pueden clasificar en termografía pasiva, activa o vibrotermografía.

La elección de un determinado método depende de varios factores, incluyendo las características térmicas del cuerpo que se está inspeccionando; del tipo, tamaño y orientación del defecto a localizar; de la forma en la que el calor se induce en el cuerpo; de la sensibilidad y resolución espacial de las imágenes infrarrojas; y de las restricciones presupuestarias.

1.1. Termografía pasiva

La termografía infrarroja (TIR) pasiva se refiere a aquellos casos en los que no se usa ninguna estimulación de calentamiento o enfriamiento externo para provocar un flujo de calor en el cuerpo inspeccionado. El objeto estudiado produce un patrón de temperaturas típico por el hecho de estar involucrado en un proceso (industrial) que produce calor. Unos pocos grados de diferencia respecto a la temperatura normal de trabajo (referencia) del objeto muestra un comportamiento inusual. La termografía es capaz de capturar esta información de temperatura en tiempo real desde una distancia segura sin ninguna interacción con el objeto.

La TIR pasiva se usa, por ejemplo, para la monitorización del producto en procesos de fabricación, monitorización de procesos de soldadura o comprobación de la eficiencia de los discos de freno de automóviles. También puede ser usada en mantenimiento predictivo, como en rodamientos, turbinas y compresores, instalaciones eléctricas, tuberías enterradas o fugas de gas. Existen otras muchas aplicaciones no industriales como son las de tipo medicinal en detección de cáncer de pecho o desordenes vasculares, detección de fuegos, detección de objetivos (militar) o localización de pérdidas de calor y humedades en edificios.

1.2. Termografía activa

La termografía activa requiere de una estimulación externa de la pieza a inspeccionar para provocar un flujo de calor en dicha pieza. Un defecto interno puede alterar ese flujo, provocando una distribución anómala de la temperatura. Existen diferentes técnicas de termografía activa en función de cómo se realiza el calentamiento o enfriamiento externo de la pieza a inspeccionar:

1.2.1. Termografía Activa Pulsada (PT)

En la termografía pulsada (PT), la superficie de la muestra se somete a un pulso de calor corto utilizando una fuente de energía alta, como por ejemplo flashes fotográficos, ver Figura 7; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** La duración del pulso puede variar desde unos pocos milisegundos (2-15 ms) o de varios segundos dependiendo de las propiedades termofísicas de la muestra y el defecto.

Después de que el frente térmico se pone en contacto con la superficie de la muestra, viaja desde la superficie a través de ella. A medida que transcurre el tiempo, las zonas defectuosas aparecerán con una temperatura más alta o más baja con respecto a zonas no defectuosas de la superficie, dependiendo de las propiedades térmicas tanto de la materia como del defecto. A la evolución de la temperatura en la superficie se la somete a un seguimiento en régimen transitorio utilizando una cámara infrarroja. Se necesita una unidad de sincronización para controlar el tiempo entre el lanzamiento del pulso térmico y la grabación con la cámara infrarroja.

La solución unidimensional de la ecuación de Fourier para una función delta de Dirac en un sólido semi-infinito isotrópico está dada por (1):

$$T(z, t) = T_0 + \frac{Q}{\sqrt{k\rho c_F \pi t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right)$$

Dónde Q es la energía absorbida por la superficie en $[J/m^2]$ y T_0 es la temperatura inicial medida en $[K]$.

En la superficie ($z=0$) la ecuación 1 se puede escribir de la siguiente forma (2):

$$T(0, t) = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \quad (2)$$

Dónde $e = (k\rho c_F)^{\frac{1}{2}} [W s^{\frac{1}{2}} m^{-2} K^{-1}]$ que es la efusividad.

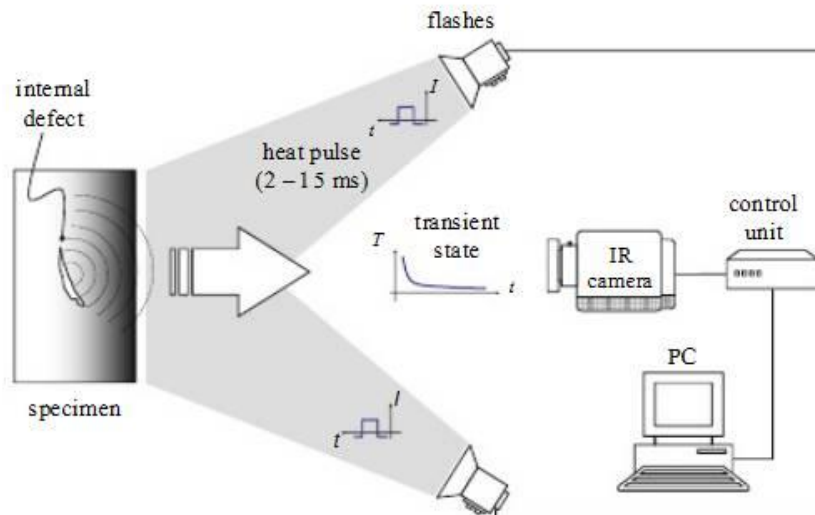


Figura 7: Representación esquemática de termografía activa pulsada

La termografía pulsada se usa, por ejemplo, en la inspección de componentes estructurales de aviones, control de calidad de soldadura por puntos, álabes de turbina, detección de descolados, delaminaciones, grietas o corrosión.

1.2.2. Lock-in (LT)

En la termografía lock-in (LT), la superficie de la muestra es periódicamente iluminado por una o varias fuentes de calor modulada, por ejemplo, lámparas halógenas, para inyectar las ondas térmicas en la muestra. La onda periódica se propaga a través del aire hasta llegar a la superficie de la muestra donde el calor se produce propagándose por el material.

Los defectos internos, que actúan como obstáculos para la propagación del calor, producen cambios en la amplitud y el desfase de la señal de respuesta en la superficie. Figura 8 muestra un experimento LT. Las lámparas envían ondas periódicas (sinusoides, por ejemplo) en un frecuencia modulada de por lo menos un ciclo hasta alcanzar el estado estacionario.

Se han desarrollado diferentes técnicas para extraer la información de amplitud y fase. El análisis de Fourier es la técnica preferida de procesamiento, ya que proporciona imágenes individuales, diagramas de amplitud o fase (la media ponderada de todas las imágenes en una secuencia).

La solución de la ley de Fourier unidimensional de una onda periódica térmica de multiplicación a través de un material homogéneo semi-infinito se puede expresar como (3):

$$T(z, t) = T_0 \exp\left(-\frac{z}{\mu}\right) \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} - \omega t\right) \quad (3)$$

Dónde $T_0 [^{\circ}C]$ es el cambio de temperatura inicial producido por la fuente de calor, $\omega [rad/s]$ es la frecuencia de modulación ($\omega = 2\pi f$ siendo f la frecuencia medida en Hz), $\lambda [m]$ es la longitud de onda y $\mu [m]$ es la longitud de difusión dada por:

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad (4)$$

Dónde $\alpha = k/\rho c_p [m^2/s]$ es la difusividad térmica, $k [W/m^{\circ}C]$ es la conductividad térmica, $\rho [Kg/m^3]$ es la densidad, $c_p [J/Kg^{\circ}C]$ es el calor específico y f la frecuencia de modulación de la onda térmica.

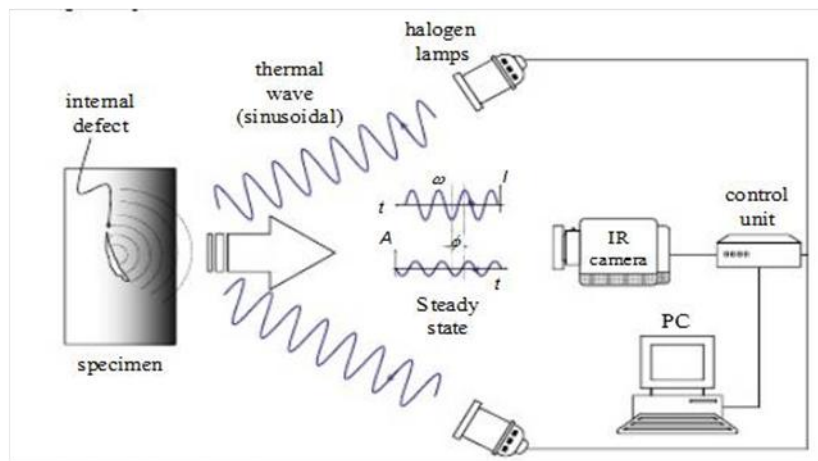


Figura 8. Representación esquemática de lock-in

La termografía lock-in se usa, por ejemplo, en inspecciones de componentes estructurales, detección de remaches sueltos, investigación de estructuras de absorción de radar y detección de grietas, descolados, etc.

1.2.3. Pulso Largo (ST)

Esta técnica consiste en calentar el objeto o la pieza a inspeccionar a baja potencia y de forma continua, monitorizando el incremento de temperatura de la superficie. Nuevamente, el frente térmico se propaga a través del material, pero en este caso

es el tiempo que tarda la temperatura de un punto dado en separarse de la evolución de la temperatura de una zona sana la que sirve de indicación de la profundidad de la heterogeneidad.

Aplicaciones de la termografía de pulso largo son, por ejemplo, la evaluación de espesores de recubrimientos y de uniones de recubrimiento a sustrato en estructuras compuestas y también la detección de corrosión oculta en el fuselaje de aviones.

1.2.4. Fase Pulsada

Es una mezcla entre la termografía activa pulsada y la termografía "lock-in". El ensayo se realiza de la misma forma que para la termografía activa pulsada pero el tratamiento de datos se realiza mediante transformada de Fourier. Se obtienen, por tanto, datos de la amplitud y de la fase de la imagen a diferentes frecuencias a partir de una serie de termogramas.

1.3. Vibrotermografía

La vibrotermografía es una técnica basada en la termografía lock-in. En lugar de realizar un calentamiento en la muestra a inspeccionar mediante lámparas de luz modulada, usa una vibración mecánica inducida externamente. Se utiliza para el mantenimiento de la calidad en el sector aeroespacial y la industria del automóvil vigilando la integridad de las características de la superficie o del subsuelo, que la termografía END convencional no puede detectar.

La vibrotermografía permite obtener imágenes mediante ondas térmicas que se generan por el sonido elástico o las ondas ultrasónicas. El mecanismo involucrado es la fricción local o de histéresis que convierte un defecto de carga dinámico en una fuente de calor, que se identifica mediante un sistema de termografía.

En la Figura 9 se muestra una representación esquemática de este método. La presencia de una grieta provoca un aumento de la temperatura en la superficie cerca de la grieta. El aumento de la temperatura se mide con una cámara de alta sensibilidad infrarroja que obtiene imágenes a partir de un amplio campo de visión. Este método cubre un área grande partiendo de una sola posición donde se produce la excitación, por lo que es mucho más rápido que la inspección convencional de corriente ultrasónica o remolino que requiere escanear toda la

superficie. También puede ser una técnica de inspección conveniente y fiable para las estructuras con geometrías complejas que son difíciles de inspeccionar por métodos convencionales.

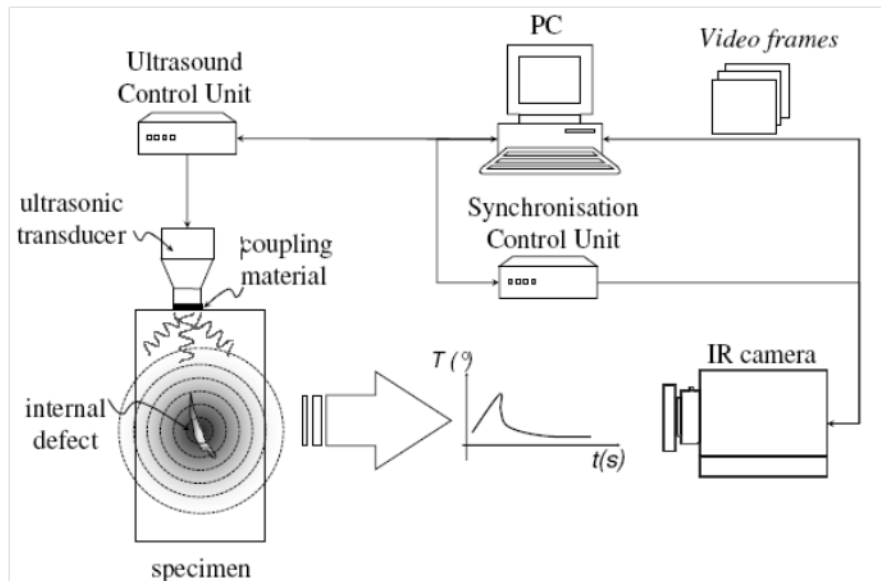


Figura 9. Representación esquemática de vibrotermografía

2. Hardware y software asociado

2.1. Cámaras Termográficas

Las cámaras termográficas son equipos que perciben la emisión natural de radiación infrarroja procedente de un objeto caliente detectado, y producen una imagen visible para el ojo humano. Esta imagen puede ser monocromática o coloreada en caso de ser una cámara que se usa exclusivamente para medir temperaturas.

Las imágenes monocromáticas muestran las áreas más calientes de un cuerpo en blanco y las más frías en negro, con distintos niveles de grises para los grados de temperatura entre los límites térmicos.

En el caso de las imágenes en color, las imágenes son procesadas por la cámara para que la imagen monocromática inicial sea coloreada. De esta manera son más fáciles de interpretar con la vista. Pero esos colores no corresponden a la radiación infrarroja percibida, sino que la cámara los asigna arbitrariamente, de acuerdo al

rango de intensidad de particular longitud de onda infrarroja, por eso se llaman *falsos colores*.

La mayoría de las cámaras operan con un rango de $3\mu\text{m}$ y $14\mu\text{m}$ de onda en la zona del infrarrojo térmico.

Toda cámara termográfica, necesita un control en la corrección de las magnitudes de medición, por lo cual es necesario hacer periódicamente alguna calibración o determinación de la desviación sistemática del indicador con respecto al valor real de la magnitud de medida.

2.1.1. Cámaras con detectores criogenizados

Los detectores están contenidos en un estuche sellado al vacío y enfriado muchos grados bajo cero Celsius por un voluminoso y costoso equipo criogénico. Esto aumenta enormemente su sensibilidad con respecto a los *detectores al ambiente*, debido a su gran diferencia de temperatura con respecto al cuerpo emisor detectado. Si el detector no fuera enfriado criogénicamente, la temperatura ambiental del detector interferiría en las lecturas de temperatura recibidas por el detector. Las desventajas de los detectores criogenizados son:

- Su alto consumo de energía para enfriar.
- El alto costo para fabricar y sellar al vacío los estuches.
- Varios minutos para enfriar el sensor del detector a la temperatura óptima de operación.

2.1.2. Cámaras con detectores al ambiente

Éstos operan a la temperatura ambiental. Los más modernos usan sensores que funcionan cambiando las propiedades eléctricas del material del cuerpo emisor. Estos cambios (de corriente, voltaje o resistencia) son medidos y comparados a los valores de temperatura de operación del sensor. Los sensores pueden estabilizarse a una temperatura de operación, por encima de los cero celsius, para reducir las interferencias de percepción de imagen, y es por eso que no requiere equipos de enfriamiento. Las ventajas de estos detectores son:

- Su menor costo con respecto a los criogenizados.
- Menor tamaño.

Pero sus desventajas:

- Mucho menos sensibilidad y menos resolución que los criogenizados.

2.1.3. Cámaras infrarrojas activas

Emiten radiación infrarroja con un reflector integrado a la cámara o ubicado en otro sitio. El haz infrarrojo ilumina el cuerpo detectado; y el alumbramiento es emitido por el cuerpo para ser percibido por la cámara e interpretado en una imagen monocromática.

El reflector tiene un filtro para prevenir que la cámara sea interferida por la observación de la luz visible. Si el reflector tiene mayor alcance mayor será el tamaño y el peso de su filtro y, mayor será el tamaño de la batería porque aumenta su consumo de energía. Por eso la mayoría de las cámaras activas portátiles tienen un reflector con alcance de 100 metros, pero algunos fabricantes exageran el alcance de las cámaras a varios cientos de metros.

2.1.4. Cámaras infrarrojas pasivas

También se llaman *cámaras termográficas*. Carecen de reflectores, y perciben la radiación infrarroja tal cual, emitida por un cuerpo. No miran cuerpos a la misma temperatura del detector, por eso se enfrían criogénicamente a temperaturas de -200 °C. Algunas de estas cámaras pueden tener sensibilidad a temperaturas de 0,01 °C.

Estas cámaras se usan para rastrear gente en áreas donde es difícil verlos (tinieblas, humo o niebla), encontrar rastros recientes de alguien que ha dejado un lugar, seguir un coche en particular o ver rastros de humedad en ciertas superficies.

2.1.5. Otros tipos de cámaras

Las cámaras termográficas también pueden clasificarse de acuerdo al sistema de detector infrarrojo que utilicen. Según esto existen las cámaras piroeléctricas, que utilizan detectores térmicos, y las cámaras con detector fotónico. Estos detectores se estudiarán más adelante.

Otra forma de clasificación se basa en las longitudes de onda de la radiación que la cámara puede detectar:

Cámaras de onda larga: Captan radiaciones térmicas con longitud de onda entre 8 y 14 μm , su rango máximo de temperaturas no sobrepasa los 500 $^{\circ}\text{C}$.

Cámaras de onda corta: Captan radiaciones entre 2 y 5 μm y la alcanzan temperaturas de hasta 1500 $^{\circ}\text{C}$.

2.2. Funcionamiento de una cámara termográfica

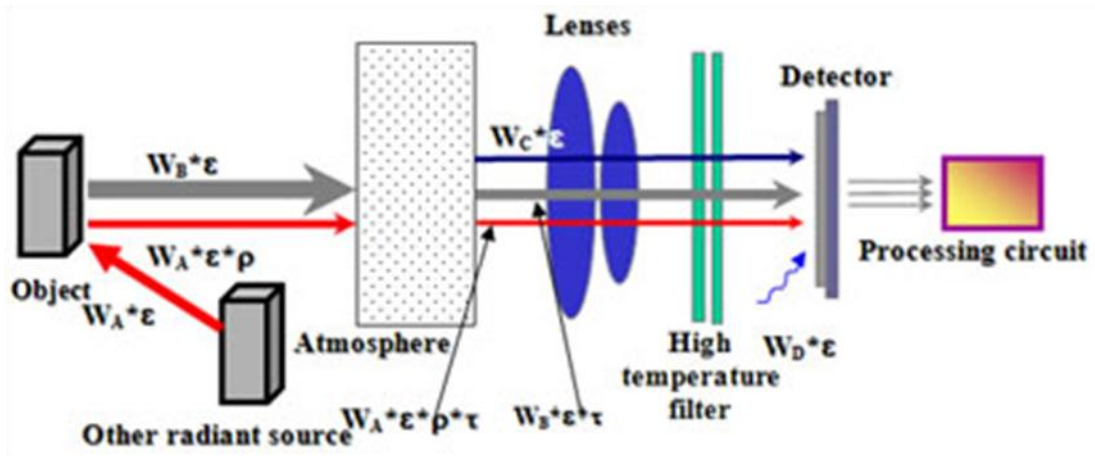


Figura 10. Esquema detallado del proceso de captación de imágenes infrarrojas

Una cámara termográfica básica consta de:

- Un sistema óptico que puede formar una imagen utilizando radiación en el rango de longitud de onda térmica.
- Uno o más detectores que convierten la radiación termal en señales eléctricas proporcionales a la radiación que incide sobre ellas.
- Algunos sistemas requieren un mecanismo que escanee el campo de visión de la cámara, aunque las cámaras más modernas no lo necesitan ya que utilizan grandes arrays de detectores que cubren completamente el campo de visión.
- Un procesador electrónico capaz de convertir la señal eléctrica en una señal de video.
- Una pantalla que genere una imagen visual de la señal de video.

El esquema de la Figura 11 muestra el proceso que siga la señal infrarroja desde el sistema óptico hasta el monitor.

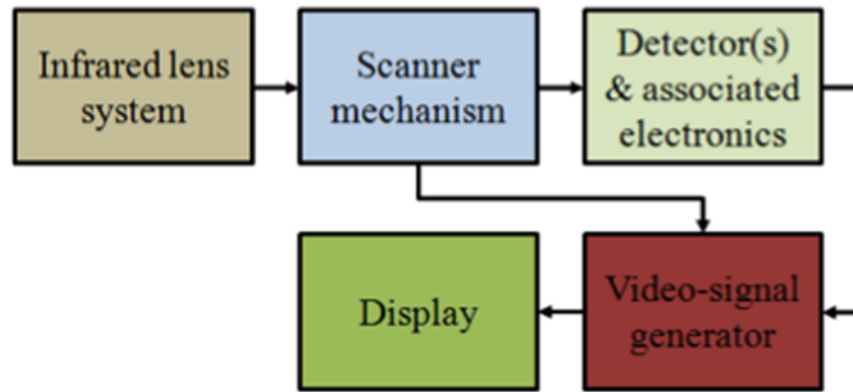


Figura 11. Camino de una señal infrarroja en un sistema de adquisición de imágenes infrarrojas

2.2.1. Sistema óptico

El diseño del sistema óptico utilizado en un sistema de visualización de imágenes termográficas es igual al sistema óptico para longitudes de onda visibles. La principal diferencia es que los materiales usados en sistemas de radiaciones visibles son diferentes. De hecho, los materiales ópticos usados en la banda de 3-5m o en la banda de 8-14m son diferentes también.

2.2.2. Detectores térmicos

El detector térmico o array de detectores es posiblemente la parte más importante de una cámara termográfica. Éste determina el nivel de potencial de la resolución térmica y espacial que se puede obtener, así como la complejidad requerida para desarrollar ese potencial.

Tipos de detectores:

Existen básicamente dos tipos de detectores infrarrojos. El primero depende de los fotones que inciden en forma de calor (radiación infrarroja), los cuales el detector absorbe, con el resultante incremento de temperatura del elemento sensor. Éste utiliza un termopar¹, instrumento que modifica su resistencia eléctrica con la temperatura, para convertir la energía térmica en una señal eléctrica. Para la

¹ Termopar: es un sensor formado por la unión de dos metales distintos que produce un voltaje (efecto Seebeck), que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado "punto caliente" o unión caliente o de medida y el otro denominado "punto frío" o unión fría o de referencia.

generación de la señal, la cámara necesita la interrupción del haz de infrarrojo de forma continua, para ello utiliza un disco obturador.

Este tipo de detector es generalmente conocido como un **detector térmico**, y son bastante ineficientes y relativamente lentos como resultado del tiempo requerido para cambiar su temperatura.

El segundo tipo de detector no utiliza la energía del fotón en forma de calor, sino que la invierte en incrementar la energía de sus portadores de carga, con lo que se modifican las propiedades de conducción eléctrica de los sistemas detectores en función del flujo de fotones recibido. Este proceso de conversión implica la transformación de los fotones incidentes en electrones, que se ponen en movimiento para generar una corriente, que es la magnitud que realmente se puede medir. Este tipo de detector se conoce como **detector fotónico o cuántico**.

Tabla 1: Características principales de diferentes tipos de detectores

Image resolution	Pitch (μm)	Principals	IR Detector material	geometric MTF (mm^{-1})	Manufacturer
1 x 128	100	pyroelectric	LiTaO	0.6 to 3	DIAS Dresden
328 x 245	48.5	pyroelectric	BaSrTi	0.6 to 5	Texas Instruments (TI)
100 x 100	100	pyroelectric	PbSkTa	0.8 to 3	GEC Marconi
384 x 288	40	pyroelectric	PbSkTa	0.8 to 5	GEC Marconi
336 x 240	50	Bolometer	VOx	0.9 to 5	Honeywell
327 x 245	46	Bolometer	VOx	0.9 to 5	Loral
128 x 128	100	Bolometer	p/n-Poly-Si	0.9 to 3	NEC
320 x 240	50	Micro-cantilaver	Bimetall TiWaufSiC	0.8 to 5	Sarcon Micro-system

La Tabla 1 muestra diferentes tipos de detectores que se usan hoy en día. En ella se representa para cada detector su resolución de imagen, pitch², principios de detección, materiales, MTF geométrico y el fabricante del detector. Esta información es útil para la selección del tipo de detectores a usar en una cámara térmica, así como los siguientes factores a considerar:

- El rango de longitudes de onda al que responde.
- La respuesta en frecuencia
- La sensibilidad térmica y la resolución espacial que se puede conseguir.

² Pitch: Se denomina pitch a la separación entre los centros de dos píxeles consecutivos. En el caso de que no haya separación entre píxeles, el pitch coincide con el tamaño de pixel.

- La refrigeración requerida y su complejidad asociada, coste, y posibles inconvenientes.
- Fiabilidad y coste.

2.2.3. Mecanismo de escáner (barrido)

La función de un mecanismo de barrido es mover la imagen formada por el sistema de la lente sobre el elemento detector de una manera muy controlada.

Existen tres disposiciones típicas para los sistemas de escáner. En la primera de ellas el escáner ocupa el espacio entre el sistema óptico y el detector. En la segunda disposición, el escáner está entre el objeto externo y el sistema óptico, y en la tercera, está colocado entre la parte delantera focal y la parte posterior del sistema óptico.

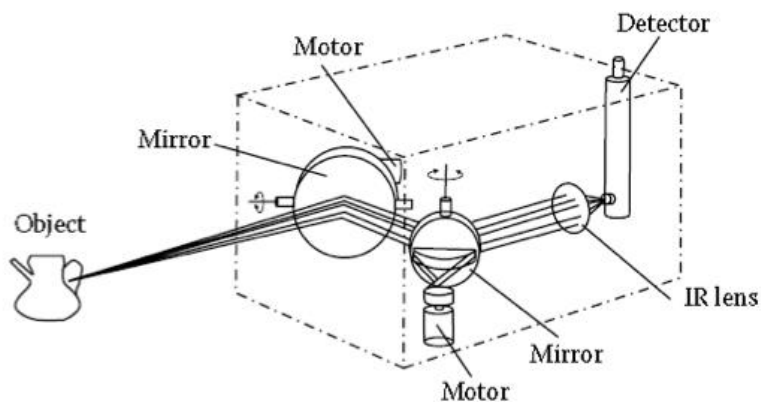


Figura 12: Mecanismo de escáner

En la Figura 12 se muestra un tipo de mecanismo para escanear la imagen infrarroja. Se trata de un esquema donde se ven dos espejos con sus respectivos motores y lentes infrarrojas junto con el detector al fondo. Los espejos con motor se utilizan para hacer un barrido de todo el campo de visión. El espejo izquierdo escanea el campo en vertical y el derecho en horizontal. Esta es una de las maneras en que las cámaras infrarrojas con un único detector de infrarrojo escanean el campo de visión.

2.2.4. Procesado de señal

La imagen térmica producida por el sistema óptico consistirá en un promedio muy alto de nivel de fondo, que corresponde a la radiación emitida por una superficie que está a temperatura ambiente, junto con desviaciones relativamente pequeñas de este nivel medio, que representa las diferencias de temperatura y emisividad entre los objetos en la escena.

Así, por ejemplo, la diferencia en la radiación recibida por una superficie a 18°C y una a 22°C en la banda de 8-12 μm es sólo el 7% del total (fondo) de radiación en la misma banda de una superficie a 20 ° C. La señal de interés en la generación de la señal de vídeo para la salida de la cámara es la que corresponde a esta diferencia y no al nivel absoluto.

Para producir una imagen en falsos colores en la cámara, la señal infrarroja es procesada en diferentes pasos, como se muestra en la Figura 13. En primer lugar, la señal se convierte de analógico a digital. El segundo paso es la compensación de la pinza de offset. A continuación se compensa la unidad de radiación por cámara para predecir la temperatura sabiendo el grado de emisión, la humedad del aire, la temperatura del aire y la distancia, (parámetros de calibración). En el siguiente paso se ajusta la temperatura de radiación, y finalmente antes de la visualización, se selecciona el rango de temperatura y falso color.

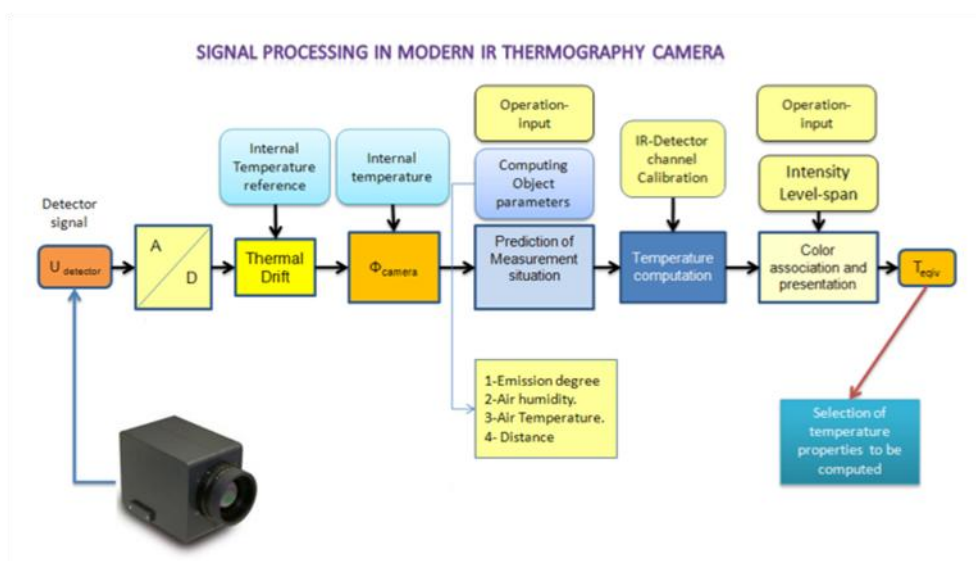


Figura 13: Procesado de señal en una cámara termográfica moderna

2.2.5. Monitor

La imagen generada por una cámara térmica es normalmente visualizada en un monitor externo separado, que podría ser una pantalla de ordenador o un pequeño monitor que forma parte de la cámara y está diseñado para ser observado directamente o a través de una óptica ocular. Las pequeñas pantallas planas de visión directa que son parte de la cámara son normalmente de cristal líquido (LCD). Estas pantallas pueden ser monocromáticas o en color. En último caso, las imágenes pueden ser codificadas con color para mostrar diferentes temperaturas con diferentes colores.

2.2.6. Resolución espacial

Un concepto muy importante a tener en cuenta a la hora de valorar una cámara de infrarrojos es la resolución espacial, pues este concepto define hasta qué distancia se podrán ver los objetos.

La resolución espacial es el campo de visión de los microsensores que forman parte del detector o microbolómetro.

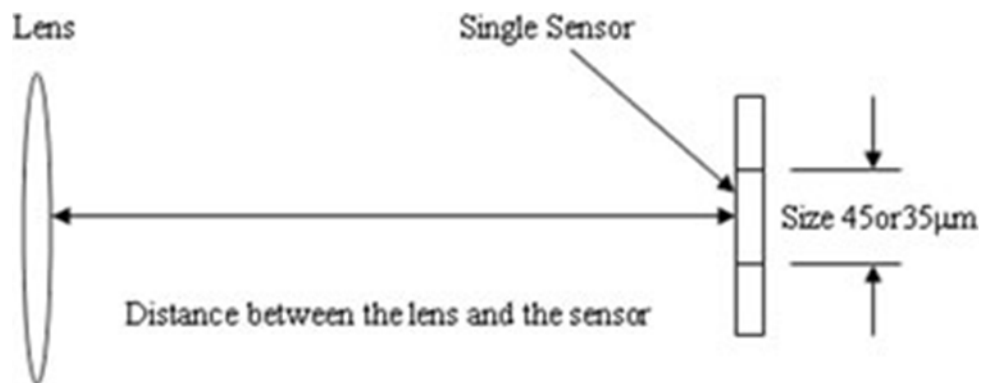


Figura 14. Resolución espacial

Se define como la relación entre el tamaño del sensor y la distancia entre las lentes y el sensor (Figura 14). Cuanto más baja sea la resolución espacial a más distancia se podrá utilizar la cámara (o, para la misma distancia, se podrán visualizar objetos más pequeños).

En la Figura 15 se aprecia la relación entre el tamaño de los objetos y la distancia a la cámara:

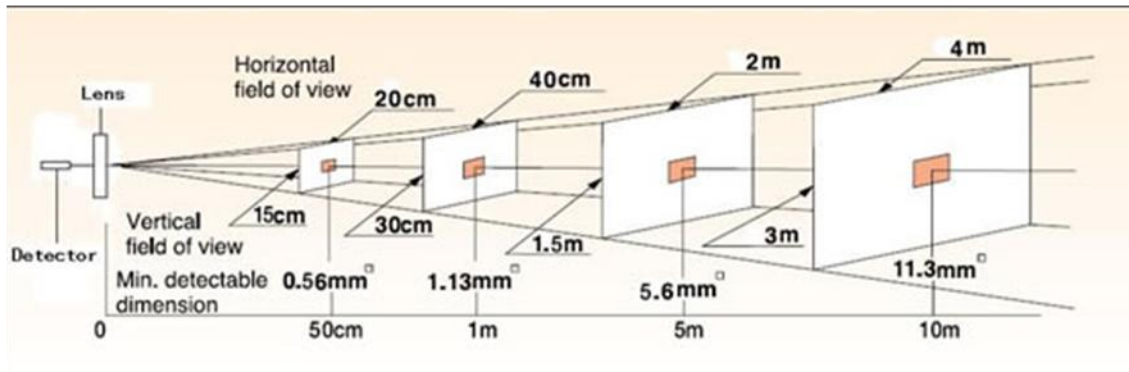


Figura 15: Relación entre el tamaño de los objetos y la distancia a la cámara

2.2.7. Preparación del equipo

Una de las operaciones fundamentales previas al examen termográfico es la calibración del equipo utilizando una fuente de radiación o simulador de cuerpo negro. También es importante tener en cuenta funciones de corrección para incluir efectos ambientales, tales como la atenuación atmosférica (función de la distancia entre el equipo y la pieza a analizar) y la corrección debida a la emisividad. La calibración debe incluir el intervalo de temperaturas más amplio posible.

Otro aspecto que debe considerarse es que la zona observada por el visor de la cámara no tiene porqué coincidir exactamente con la zona espectral analizada por el sensor térmico. Un método para aumentar la precisión consiste en introducir lo más próxima posible a la pieza a medir, una referencia de emisividad conocida.

2.2.8. Parámetros que se deben controlar

Hay una serie de parámetros críticos que se deben controlar para conseguir un buen rendimiento en la medida termográfica:

- Resolución térmica: para determinar la mínima diferencia de temperaturas que se puede medir.

- Resolución espacial de la imagen o campo de visión instantáneo.
- Medida de la resolución espacial, a través de una rendija normalizada.

2.2.9. Normas y cualificación

Aunque casi todos los organismos reguladores y certificadores tienen normas tanto para la realización de ensayos termográficos y cualificación de personal, no existe una normativa o procedimiento específico para llevar a cabo estos ensayos en materiales metálicos soldados.

2.2.10. Cámaras comerciales y su software

En este apartado se presentan algunos ejemplos de cámaras comerciales junto con el software utilizado para el análisis de las imágenes termográficas, ya que cada fabricante proporciona el suyo.

Cámaras termográficas NEC

Thermo Tracer H2630 (cámara portátil)

Cámara utilizada para trabajos de inspección de instalaciones eléctricas, mecánicas, energías renovables o edificación. Utiliza detectores infrarrojos de 640 x 480 píxeles³ ofreciendo gran sensibilidad y precisión. Presenta en tiempo real imágenes térmicas de alta resolución. Además permite adjuntar una foto real al termograma realizado ya que incorpora una cámara digital color con resolución de 1280 x 1024 píxeles. Tiene una sensibilidad de 0.04°C y una precisión de $\pm 2\%$.



En la Tabla 2 se muestran algunas de sus especificaciones técnicas:

³ Número de píxeles: Da una medida de la resolución del sensor. Puede darse en forma de altura por anchura (ej: 600x400 píxeles) o simplemente la cantidad total de píxeles (ej: 240000 píxeles).

Tabla 2. Especificaciones técnicas de la cámara Thermo Tracer H2630

Rangos de Medida	
Rango 1	20 a 60 °C
Rango 2	-40 a 120 °C
Rango 3	0 a 500 °C
Rango 4 (opcional)	200 a 2000 °C
Resolución	0.04°C(a 30 °C)
Precisión	±2 °C o ±2% del valor leído
Detector	640 x 480 píxel (UFPA microbolometer)
Rango espectral	8 a 14µm
Distancia de enfoque min	0.3m
Campo visual	21.7 °(H) x 16.4 °(V)
Frecuencia de imagen	30 imágenes/seg.
Corrección de emisividad	0.10 a 1.00 (en pasos de 0.01)
Señal de vídeo	NTSC/PAL, compuesto/S-video
Interface	IEEE 1394, USB2.0

TS 9100 (cámara fija)

Ésta es una cámara termográfica fija para monitorización de procesos industriales, control de refractarios y puntos críticos, etc.

Especialmente indicada para plantas petroquímicas, fundiciones, estudios ambientales y seguridad.

La conexión a PC se realiza a través de Ethernet o IEEE y se pueden configurar diferentes ventanas de evaluación dentro de la imagen para el control de diferentes zonas, las cuales activarán una señal de alarma en caso de sobrepasar los valores de temperatura configurados.

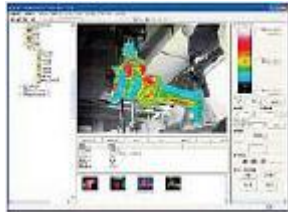
**Tabla 3. Especificaciones técnicas de la cámara TS 9100**

Rango de Medida	-40°C a +500°C
Resolución	0.08°C
Precisión	±2 °C o ±2% del valor leído
Detector	320 x 240 Microbolometer Uncooled FPA
Rango espectral	8 a 14µm
Distancia de enfoque min	0.3m
Campo visual	21.7 °(H) x 16.4 °(V)
Frecuencia de imagen	60 Hz
Corrección de emisividad	0.10 a 1.00 (en pasos de 0.01)
Señal de vídeo	NTSC/PAL
Interface	IEEE 1394, Ethernet

Estos son algunos de los programas que NEC ofrece para sus cámaras:

NEC San-ei NS 9500

Programa informático de documentación de imágenes termográficas y análisis de secuencias con funciones de ajuste y varias paletas de colores.



Acepta la selección de múltiples puntos de medida, líneas de perfil, áreas, histogramas, gráficos de tendencia, función multisense, etc...

Ayuda para realizar informes de manera sencilla con imágenes térmicas y datos de temperatura en Word y

Excel.

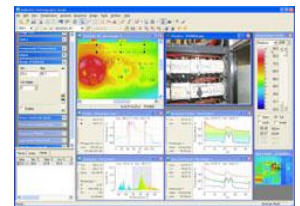
Realiza fusión de imágenes térmica y visual

Posees la función de sustracción de 2 imágenes infrarrojas.

GTS 5.1

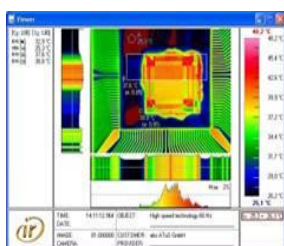
Programa avanzado de análisis de termogramas y generación de informes.

Ofrece una amplia gama de funciones de análisis como la detección automática de punto caliente, la tendencia de múltiples puntos, línea de tendencia, tendencia de área, isoterma, histogramas, línea de perfil de temperatura, estadísticas de regiones de interés, etc.



Todas las herramientas de análisis permiten la corrección de emisividad para regiones independientes o la imagen completa. Incluye herramientas de análisis como la sustracción de imágenes, composición de imágenes y la exportación de secuencia termográfica (JPEG, mapas de bits, AVI).

irMOTION PROFESSIONAL



Es un programa de registro en tiempo real mediante FireWire ,LAN, HDCP, USB2, RS-422, etc. La tecnología de múltiples líneas permite una visualización simultánea, almacenamiento digital, recuperación de datos, acceso a disparo y análisis de imágenes infrarrojas en directo.

Ejecución simultánea de varios parámetros de emisividad local con indicaciones de colores en directo, gráficos de distribución animados y registro digital sin compresión en disco duro.

Cámaras termográficas Flir

FLIR i5/i7

Son totalmente automáticas; todo lo que tiene que hacer es apuntar y apretar para ver las variaciones de calor en el ambiente en que se encuentre y localizar exactamente lo que busca.

Las lecturas infrarrojas de las FLIR i5/i7 son visibles, claras y aparecen inmediatamente en su pantalla a color. Se pueden grabar todas las lecturas de imagen para futuras referencias. Estas cámaras se utilizan para detectar problemas ocultos, evaluar daños, localizar humedad y fugas, identificar pérdidas de energía y mal aislamiento y reconocer fallas eléctricas y de sobrecalentamiento.



Tabla 4: Especificaciones técnicas de la cámara FLIR i5/i7

Rangos de Medida	De 0° C a 50° C (de 32° F a 122° F)
Precisión	±1 °C o ±2% del valor leído
Detector	120x120 pixeles
Rango espectral	7.5 a 13µm
Distancia de enfoque min	0,6m
Campo visual	25°(H) x 25°(V)
Frecuencia de imagen	90Hz

Serie-SC5000

Estas cámaras están diseñadas específicamente para análisis de tensión, pruebas mecánicas y tareas industriales, educativas, de I+D, termografía IR y pruebas no destructivas. Son de alta resolución espacial lo que permite la más alta sensibilidad y precisión. Su matriz de plano focal de antimonio de indio, con formato de 320x240 ó 640x512 píxeles, proporciona una frecuencia de imagen de 100 ó 380 hertz respectivamente, manteniendo una excelente linealidad y formas

de alta sensibilidad. El uso de la tecnología de circuito lector integrado logra menor grado de ruido y mayor grado de píxel, sin afectar la sensibilidad.



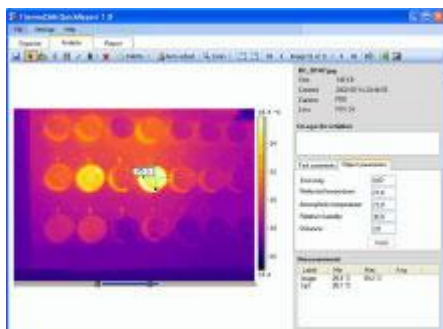
Figura 16. Cámaras de la serie SC5000

Tabla 5: Especificaciones técnicas de la cámara SC5000

Rangos de Medida	De -20 °C a 3000 °C
Precisión	±1 °C o ±1% del valor leído
Detector	320x240 ó 640x512 píxeles
Rango espectral	2.5-5 μm
Distancia de enfoque min	0,6m
Campo visual	42º(H) x 34º(V)
Frecuencia de imagen	hasta 380 Hz

Estos son algunos de los programas que Flir ofrece para sus cámaras:

QuickReport



- - El software permite al usuario ajustar el nivel, el intervalo de tiempo, el zoom y la panorámica de la cámara. Ofrece una selección de diez diferentes paletas de color. La alarma advierte si existe riesgo de condensación en la superficie, crecimiento de moho y aislamiento

inadecuado.

- - Las plantillas de reporte integradas le permiten al usuario incluir dos imágenes infrarrojas, o una infrarroja y una digital. Las descripciones de la imagen y los comentarios de voz y texto se podrían transmitir automáticamente en el reporte.
- - La etiqueta «Analyze» en el QuickReport de FLIR despliega información de imagen y herramientas para ajustar las herramientas de medición, los parámetros del objeto, comentarios de texto y la tabla de resultados de medición. El reporte de inspección incluye una imagen IR y una imagen digital, además de la tabla de resultados de análisis.

Reporter Building

Paquete de software diseñado especialmente para llevar a cabo análisis avanzados de las estructuras de los edificios. Se utiliza para analizar imágenes que se tomaron con cámara infrarroja en el área inspeccionada y elaborar reportes de inspección basados en dichas imágenes.

ThermaCAM Researcher

Diseñado para los profesionales en Investigación y Desarrollo, científicos y otros usuarios de infrarrojos que desean un detallado análisis estático o en tiempo real de los procesos térmicos.

Detallado también para usos en ambientes científicos donde se requiere un análisis térmico detallado de eventos transitorios. Basado en Windows® y altamente versátil, el ThermaCam Researcher da un nuevo nivel de poder y flexibilidad a las imágenes térmicas, al poseer características de análisis extensivos, así como adquisición de datos a alta velocidad. El Researcher, de manera perfecta, almacena, colecta y analiza imágenes IR y datos directamente de la cámara IR, lo que permite una profunda y precisa evaluación del desempeño térmico.

2.2.11. Otros equipos

Dispositivo de imagen térmica: RAYTEK MP150

El MP150, el componente principal de toda la serie de procesadores de imágenes, es un explorador de líneas de alta precisión; es una manera eficiente y de costo

razonable de medir temperaturas de extremo a extremo para el control de la uniformidad del producto.

Permite una rápida exploración de imágenes térmicas en tiempo real, de hasta 150 líneas por segundo. Además ofrece la posibilidad de selección de distintos modelos y respuestas espectrales.

Escáner lineal infrarrojo: OPC RAYTEK

Escáner diseñado para el monitoreo de hornos rotatorios, que detecta puntos calientes y evita daños costosos y tiempos muertos no programados.

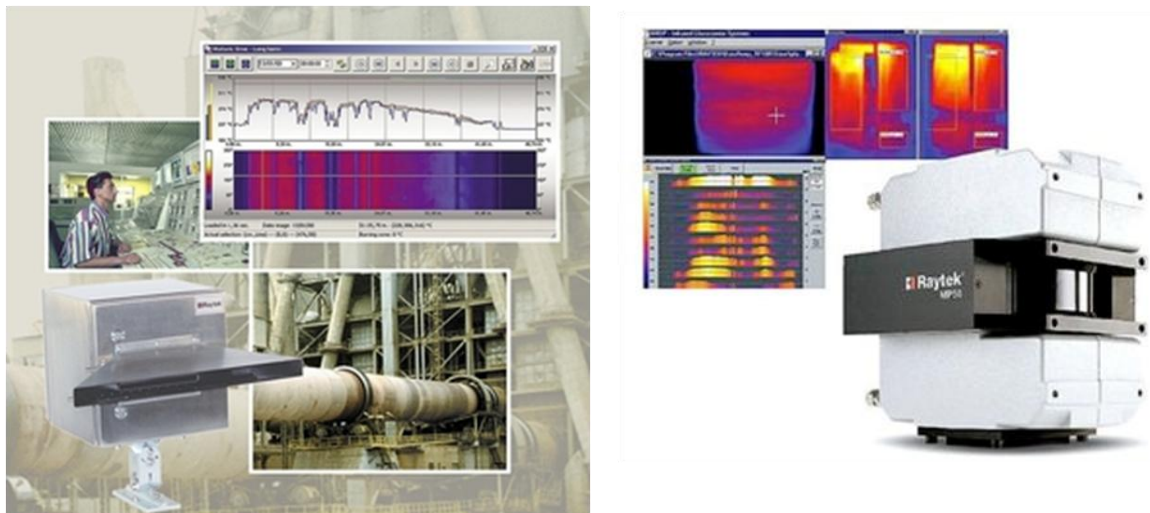


Figura 17. Escáner RAYTEK

- Detecta condiciones anormales de operación tales como posición y forma defectuosas de la flama
- Optimiza y administra el mantenimiento del horno
- Extiende la vida operacional del horno y refractarios
- Mapea la superficie completa del horno y la muestra en formato de termograma en tiempo real

Accesorios opcionales, completamente integrados, extienden la capacidad al incluir detección de zonas ocultas, monitoreo de la zona de combustión, deslizamiento de llantas y control de ventiladores.

ThermoScope™

El sistema Thermo Scope™ es una unidad compacta diseñada más específicamente para aplicaciones de campo.

Ofrece las posibilidades de un sistema de laboratorio en una unidad compacta útil tanto para el transporte como para operaciones de campo. Es un equipo liviano en el que está integrado la adquisición, el procesamiento y el análisis de imágenes térmicas. Es compatible con cualquier cámara infrarroja y realiza las siguientes funciones:

- Análisis automático de la imagen para decisiones puntuales.
- Avanzado procesamiento de la señal para el caso de las cámaras infrarrojas análogas.
- Simple operación con botones de interfase.
- Análisis cuantitativo del defecto tanto para el área que ocupa como su ubicación en profundidad.



Figura 18. Sistema Thermo Scope

Microscopio infrarrojo

El microscopio infrarrojo permite el análisis de rastros de componentes, contaminantes, laminados de múltiples capas, películas delgadas, capas, productos farmacéuticos y fibras. Muestras tan pequeñas como de 10 mm pueden ser analizadas. Cada sistema proporciona una pantalla de vídeo y la capacidad de

grabar, los usuarios pueden archivar imágenes de muestras para una demostración fácil o publicación.

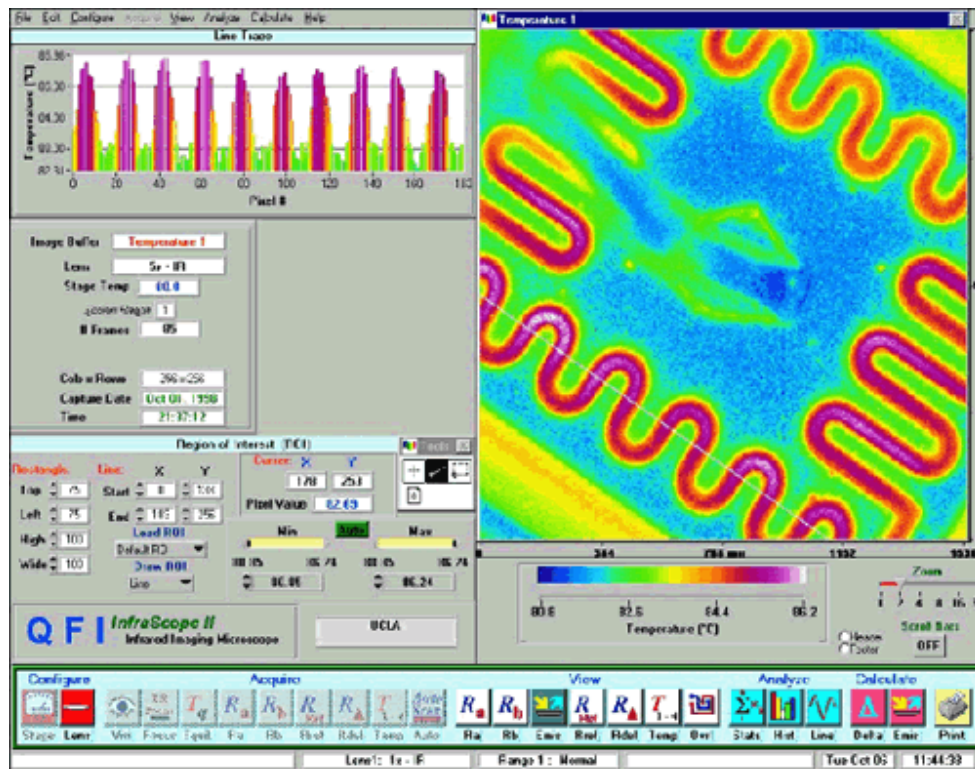


Figura 19. Captura del interfaz del SW controlador de un microscopio infrarrojo

Las áreas de aplicación del microscopio infrarrojo son:

- Micro mapeo térmico
- Verificación del diseño térmico
- Control de calidad
- Garantía de calidad
- Optimización de la Fiabilidad
- Estudios de disipación de calor
- Uniones y continuidad térmica
- Detección de puntos calientes

Como ejemplo de microscopio infrarrojo vamos a tomar el modelo AIM-8800. Éste posee control total del movimiento de la platina, tamaño de apertura y enfoque, todo desde la pantalla de la PC.



Figura 20. Microscopio infrarrojo

Ofrece soporte para análisis por transmisión, reflexión y métodos ATR, y una alta sensibilidad. Para mayor facilidad de uso, existe el software AIM View, con el que se puede controlar lo siguiente:

- Apertura automática - maximiza la radiación infrarroja en el punto de muestra.
- Platina X-Y automática - simplifica el posicionamiento de la muestra. Se pueden almacenar hasta 10 posiciones de muestra y 2 de referencia. El movimiento puede ser tan pequeño como $1\mu\text{m}$.
- Enfoque automático
- Centralización automática

El escáner de termografía infrarroja SCAN

Medición de temperatura a distancia

El escáner SCAN de termografía infrarroja de barrido lineal permite medir la temperatura durante los procedimientos industriales. Este control, realizado sin contacto a una cadencia de 20 a 400 líneas por segundo, cubre campos de aplicación muy variados.

SCAN se utiliza en numerosas plantas de todo el mundo en la fabricación de vidrio, papel, plástico, tabaco, además de en la producción de cemento, en la metalurgia, la siderurgia y la industria electrónica.

Capítulo 4 Análisis de Imágenes Termográficas

1. Preprocesado de Imágenes Termográficas

El principio de detección de defectos o singularidades en objetos se basa en el hecho de que el frente térmico se propaga homogéneamente a través del material salvo en presencia de heterogeneidades o defectos. Si hubiera algo en el interior del material que tuviera diferentes propiedades térmicas, la conducción del calor sufriría variaciones y esto se reflejaría en la superficie de la muestra mediante la aparición de puntos de contraste térmico. Por lo tanto, la precisión en la medida de temperaturas debe estar garantizada y es por ello que existe un preprocesado con

el que se pretenden minimizar los efectos de la óptica y la electrónica que captura los valores de esa temperatura superficial. Este preprocesado cubre diversas etapas que se presenta a continuación.

1.1. Píxeles defectuosos (badpixels)

La primera etapa de preprocesado consiste en regenerar los píxeles defectuosos (badpixel). Se puede definir píxel defectuoso como píxel anómalo que se comporta de diferente forma a los demás píxeles del array, esto es, píxeles que presentan niveles anormales de intensidad sean muy bajos (en negro), deadpixel o píxel muerto, o muy altos (en blanco), píxel caliente, y que no proporcionan ninguna información de utilidad y sólo contribuyen a deteriorar el contraste de la imagen. Afortunadamente, éstos pueden ser detectados fácilmente con un algoritmo de detección, por ejemplo haciendo pasar un filtro de detección (kernel⁴) o simplemente por detección visual por un operador, para después ser remplazados por el valor promedio de los píxeles adyacentes. El termograma no corregido de la Figura 21b corresponde a una Placa de acero con 25 inclusiones de Teflon de diferentes tamaños y en varias posiciones. La Figura 21f muestra el resultado después de restaurar los píxeles defectuosos.

1.2. Ruido de Patrón Fijo (FPN)

El siguiente paso es la corrección del ruido de patrón fijo (FPN Fixed Pattern Noise) causado por diferencias en la responsividad de los detectores. Se trata de un problema común cuando se trabaja con conjuntos de plano focal (FPA Focal Plane Arrays). Para los casos en que la escena es fija, este problema puede corregirse con la sustracción de una imagen 'fría', esto es, el termograma grabado antes de la aplicación del impulso de calor en la superficie. Cabe mencionar que el FPN depende del tipo de configuración utilizada para conformar la matriz de detectores. En general, las cámaras a base de CMOS (Complementary Metal-Oxide

⁴ El concepto de kernel se entiende como una matriz de coeficientes donde el entorno del punto (x,y) que se considera en la imagen para obtener g(x,y) está determinado por el tamaño y forma del kernel seleccionado. Aunque la forma y tamaño de esta matriz es variable y queda a elección de cada usuario, es común el uso de kernels cuadrados nxn. Dependiendo de la implementación, en los límites de la imagen se aplica un tratamiento especial (se asume un marco exterior de ceros o se repiten los valores del borde) o no se aplica ninguno. Es por ello, que el tipo de filtrado queda establecido por el contenido de dicho kernel utilizado

Semiconductor) contienen niveles de ruido más altos que sus contrapartes construidas con CCDs (Charge-Coupled Devices). La Figura 21c muestra el FPN (líneas verticales) en el termograma.

1.3. Encuadre (vignetting)

El encuadre (vignetting) es sin duda uno de los problemas más complejos en Termografía. El encuadre consiste en un oscurecimiento de las esquinas de los termogramas respecto al centro de los mismos debido a una exposición limitada en esas áreas (ver Figura 21d) y depende de la localización del píxel y la diferencia de temperatura respecto a la del ambiente. El procedimiento de corrección de encuadre requiere una etapa de calibración que involucra la toma de termogramas de cuerpo negro a diferentes temperaturas (en el rango de operación).

1.4. Calibración de temperatura

Las imágenes obtenidas con la cámara infrarroja, son imágenes en escala de grises. De ellas se desprenden secuencias de datos que consisten en matrices tridimensionales donde cada punto posee dos coordenadas espaciales y una de intensidad arbitraria (brillo) que necesita de una etapa de calibrado para poder ser transformada en temperatura. Al igual que en el caso de la corrección de encuadre, la calibración en temperatura requiere la obtención de varias imágenes de intensidad a diferentes temperaturas. Este procedimiento consiste en colocar la cámara infrarroja en frente de una fuente de referencia de temperatura (por ejemplo un cuerpo negro) a varias temperaturas diferentes, conocidas. Mientras la fuente de referencia varía de temperatura, las imágenes infrarrojas se van grabando. El resultado es un polinomio (de tercer o cuarto grado) obtenido por regresión de los datos de temperatura con respecto a los niveles de gris dados por la cámara. La Figura 21f muestra el termograma de la Figura 21b corregido en píxeles defectuosos, FPN, encuadre, y transformado en temperatura.

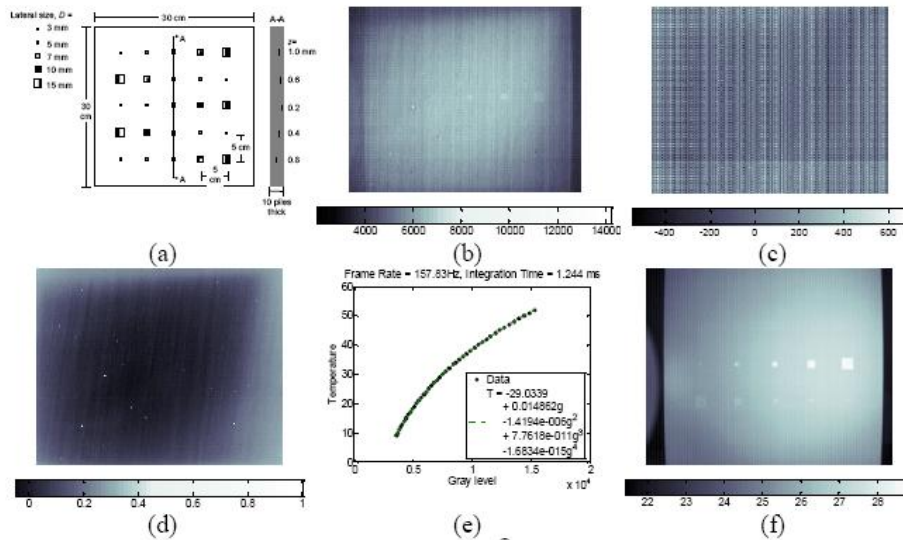


Figura 21 (a) Placa de acero con 25 inclusiones de Teflon de diferentes tamaños y en varias posiciones; (b) termograma inicial tomado 209ms después del pulso de calor; (c) ruido de patrón fijo; (d) badpixels y vignetting; (e) curva de calibración de temperatura; (f) termograma en (b) con corrección de ruido de patrón fijo, badpixels y vignetting y calibrado en temperatura.

1.5.Reducción de ruido

Una de las técnicas de procesado y post-procesado más usadas es la reducción de ruido. Si la imagen corregida aún posee niveles altos de ruido, es necesaria una etapa de filtrado. Existe un gran número de técnicas de filtrado que pueden aplicarse a imágenes infrarrojas tanto espacial como temporalmente, por ejemplo, el uso de un filtro Gaussiano con determinada varianza o las técnicas de promediado por píxeles vecinos mediante una máscara o kernel [1]. La Figura 22a y b muestra un termograma antes y después de aplicar un filtro Gaussiano, respectivamente.

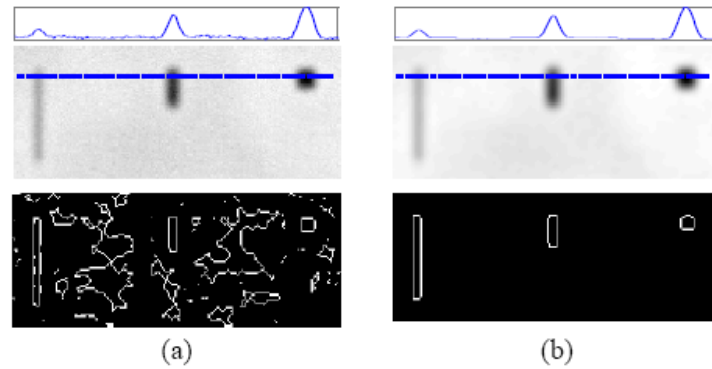


Figura 22. (a) Termograma sin filtrar; (b) termograma después de aplicarle un filtro Gaussiano: perfiles espaciales de los defectos (arriba), diagramas de fase (en medio) y resultados de segmentación usando el método de Canny para detección de bordes.

2. Procesado

2.1. Métodos de contraste térmico

Dentro del ETND se usa el contraste térmico con el fin de evaluar la visibilidad de un defecto, mejorar la calidad de la imagen y determinar la profundidad, grosor y tamaño de los defectos dentro de un material.

2.1.1. Contraste térmico clásico

El contraste térmico, en su modo más simple, puede definirse como la diferencia entre la temperatura en una zona no defectuosa T_{no_def} , y una región defectuosa T_{def}

$$Ca(t) = \Delta T(t) = T_{def}(t) - T_{no_def}(t) \quad (1)$$

a este tipo de contraste se le denomina contraste absoluto.

En la Figura 23 se observan las curvas de temperatura para un punto sin defecto y otro con defecto y su contraste térmico absoluto.

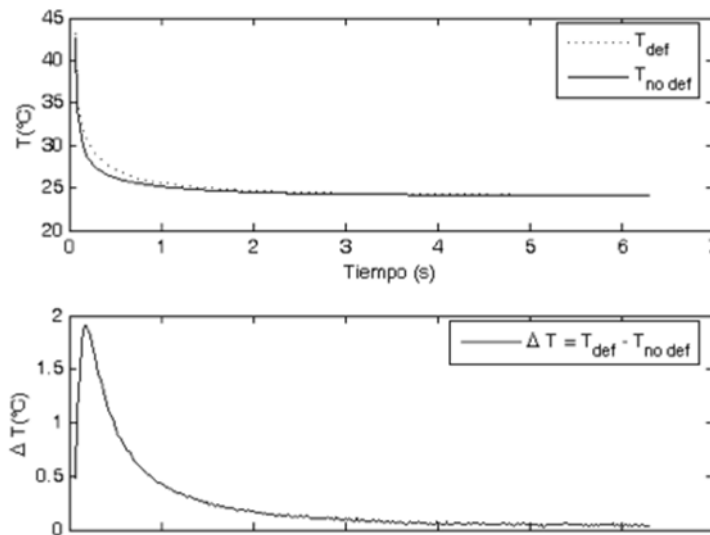


Figura 23. Curvas de temperatura y contraste térmico entre un área defectuosa y un área no defectuosa

Existen otros tipos de contraste tales como: el contraste relativo, normalizado y estándar. Todos estos tipos de contraste requieren la localización previa de un área no defectuosa en la muestra del material para usar su temperatura. La definición de esta área es un asunto crítico. En la práctica, dicha localización no es posible ya que no se conoce con anterioridad donde están ubicados los defectos, en caso de que existan. El método de contraste absoluto diferencial ha sido desarrollado para resolver este problema.

2.1.2. Contraste Absoluto Diferencial

El método de Contraste Absoluto Diferencial (CAD) se desarrolla con el fin de calcular adecuadamente la temperatura de un área no defectuosa a través de la solución unidimensional de la ecuación de Fourier para materiales homogéneos y semi-infinitos estimulados con un impulso térmico Delta de Dirac expresada en la siguiente ecuación (2):

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

En donde T_0 es la temperatura inicial de la placa, Q es la energía por unidad de área depositada sobre la placa y b es la efusividad térmica del material. Combinando las ecuaciones 1 y 2 se llega a la siguiente expresión:

$$\Delta T_{dac} = T_{def} \sqrt{\frac{t'}{t}} \times T(t') \quad (3)$$

en donde tiempo t' es un tiempo dado entre el instante en el cual el impulso Dirac de calor llega a la muestra y el instante en el cual se observa por primera vez un defecto en el experimento.

Sin embargo, dado que el método CAD está basado en un modelo unidimensional para placa semi-infinita, es decir que no se toma en cuenta el espesor de la placa, el error en los resultados por el método CAD aumenta para tiempos largos (al final de la secuencia), cuando el frente de calor alcanza el lado opuesto de la placa. Este efecto puede verse en la Figura 6 que muestra las curvas de contraste correspondientes a 5 insertos cuadrados de Teflón® de 15 mm de lado entre 0.2 y 1.0 mm de profundidad, como se indica en la gráfica. El contraste aumenta en tiempos largos en lugar de decrecer gradualmente.

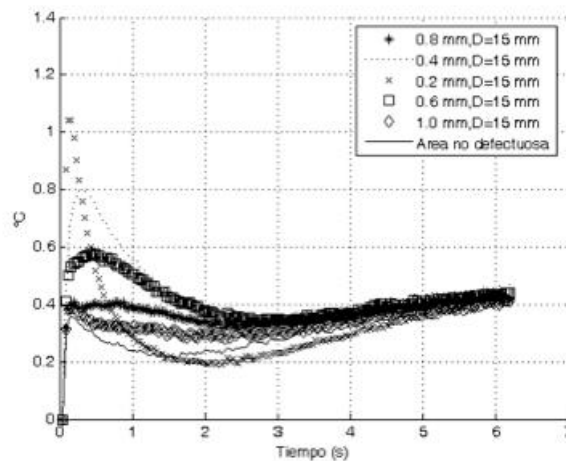


Figura 24. Curvas CAD clásico de los defectos de 15 mm de diámetro en la muestra PRC006.

En la próxima sección se describe una nueva versión del CAD en donde se toma en cuenta el grosor de la placa.

2.1.3. CAD modificado por cuádruplos térmicos

El CAD modificado por cuádruplos térmicos es un nuevo tipo de contraste, cuyo modelo de área no defectuosa es más apropiado que aquel usado en el CAD clásico. Esta nueva técnica está basada en cuádruplos térmicos que se definen como un

método empleado para resolver problemas de transferencia de calor con base en la transformada de Laplace.

Este método transforma las ecuaciones diferenciales del dominio espacio-tiempo en el dominio de Laplace, en donde se puede tener una representación simple y explícita del problema tratado. Después de aplicar la transformada de Laplace, el problema puede ser resuelto en el dominio de Laplace para después ser transformado de vuelta al espacio original por transformada inversa.

Por esta razón, este método se usa para la solución del problema directo (cálculo de la respuesta térmica de un sistema) y del problema inverso (determinación de parámetros del sistema con base en la respuesta térmica). Sin embargo, dada la base analítica de este método se restringe a problemas lineales con geometrías simples.

Aprovechando estas características se hace un estudio de una placa finita que recibe un impulso de calor Delta de Dirac y se quiere conocer la temperatura sobre la cara que recibe este impulso. La Figura 25 muestra una placa hecha de material compuesto con espesor L (m) que es sometida a un impulso de calor Delta de Dirac Q (J/m^2) depositado sobre su cara superior ($x = 0$). Mientras que su cara inferior ($x = L$) permanece térmicamente aislada.

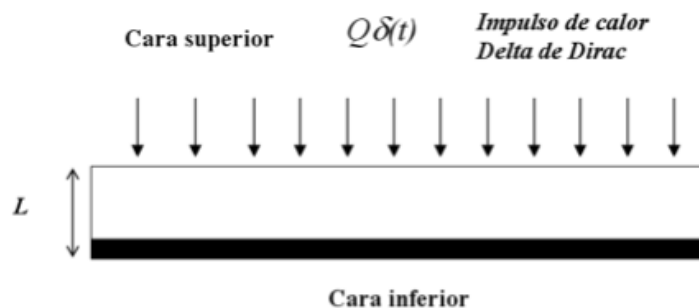


Figura 25. Placa finita de material compuesto sometida a un impulso térmico delta de Dirac

Mediante la técnica de cuádruplos térmicos es posible encontrar la temperatura de la cara superior de este sistema en el dominio de Laplace:

$$\theta_{sup}(p) = \frac{Q}{b \cot \sqrt{pL^2/\alpha}} \quad (4)$$

en donde $\theta_{sup}(p)$ es la temperatura en el dominio de Laplace en la cara superior de la placa, p es la variable del dominio de Laplace, Q es la densidad total de energía entregada por el impulso de Dirac, L es el espesor de la muestra, α es la difusividad térmica del material y b es la efusividad térmica del material.

Las distribuciones de temperatura en la cara superior para los tiempos t y t' se pueden expresar de la siguiente manera:

$$T_{no_def}(t) = \frac{Q}{b} L^{-1} \left[\coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}} \right]_t \quad (5)$$

$$T_{no_def}(t) = \frac{Q}{b} L^{-1} \left[\coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}} \right]_{t'} \quad (6)$$

Combinando las ecuaciones 5 y 6 se obtiene la siguiente expresión para el CAD modificado:

$$\Delta T_{CADCORR} = T(t) - \frac{T_{no_def}(t) = \frac{Q}{b} L^{-1} \left[\coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}} \right]_t}{T_{no_def}(t) = \frac{Q}{b} L^{-1} \left[\coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}} \right]_{t'}} T(t') \quad (7)$$

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

En la Figura 26 se observan las curvas del CAD modificado para los mismos defectos analizados anteriormente mediante el CAD sin modificar. En este caso el desempeño del CAD modificado se mantiene para tiempo largos, es decir que para el final de la secuencia el contraste desciende casi a cero, lo que representa una mejora significativa respecto al método anterior ya que constituye un modelo más apropiado para representar la difusión de calor a través de la muestra.

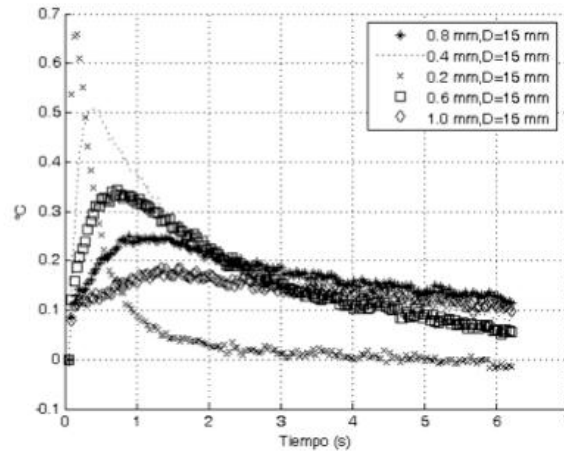


Figura 26. Curvas de CAD modificado de los defectos de 15 mm de diámetro en la muestra PFRC006

2.2. Termografía de fase pulsada

El procesamiento de imágenes infrarrojas a través de la termografía de fase pulsada consiste en pasar del dominio temporal al espectro frecuencial la respuesta de la muestra inspeccionada. Esto se hace mediante la Transformada de Fourier Discreta (TFD), aplicándose sobre cada píxel de la secuencia de termogramas.

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) e^{-j2\pi nk/N} = Re_n + Im_n \quad (8)$$

donde n corresponde a los incrementos de frecuencia ($n=0,1,\dots,N$); Δt es el intervalo de tiempo entre adquisiciones; Re_n y Im_n son las partes real e imaginaria de la transformada de Fourier, que pueden combinarse para extraer la amplitud A_n , y la fase ϕ_n :

$$A_n = \sqrt{Re_n^2 + Im_n^2}, \phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{Im_n}{Re_n} \right) \quad (9)$$

Con la termografía de fase pulsada se puede estimar la profundidad de un defecto. Esta estimación se basa en la relación que existe entre la profundidad del defecto z , y la difusividad térmica α , evaluada a la frecuencia límite f_b dada por la siguiente expresión:

$$z = C_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f_b}} \quad (10)$$

donde α es la difusividad térmica, y C_1 es la constante de regresión que toma un valor igual a la unidad cuando se trabaja con imágenes de amplitud, y un valor de aproximadamente 1.8 en el caso de la fase.

Cualquier función puede ser descompuesta en sinusoides y, en particular, la evolución temporal de la temperatura superficial de un objeto bajo excitación pulsada da lugar a una respuesta en amplitud y en fase que son de forma par e impar, respectivamente, respecto a la frecuencia $f=0$ Hz.

A partir de estas respuestas a la evolución de cada píxel, se procesan secuencias de amplitud y fase para toda la superficie en forma de imágenes

La fase es particularmente interesante en ensayos no destructivos ya que está menos afectada por los problemas típicos de la termografía activa, como son, reflexiones del entorno, variaciones de emisividad, calentamiento o excitación no uniforme, geometría de la superficie y su orientación.

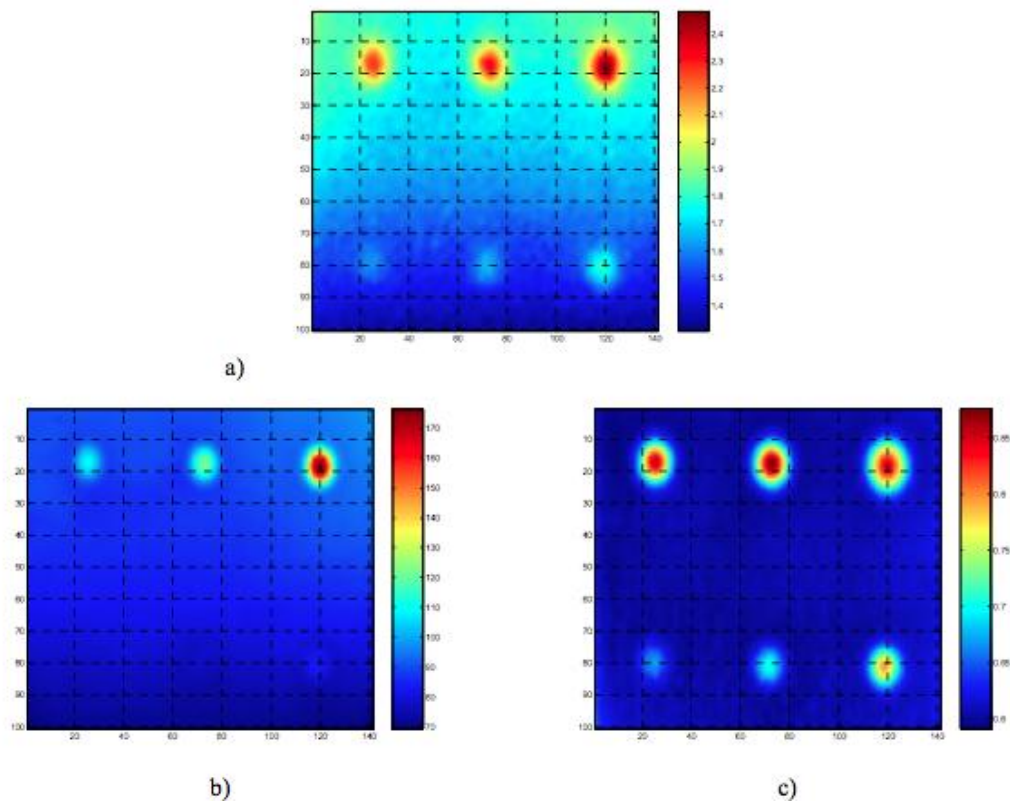


Figura 27. c) muestra una imagen de fase, o fasegrama, obtenida al aplicar la PPT a la secuencia corregida como en a). Como puede observarse, se logra una mejora considerable del contraste entre zonas sanas y defectuosas gracias a la utilización de la fase. Además, puede alcanzarse una mejora de contraste aún más notable al utilizar el algoritmo PPT con datos sintéticos de entrada en vez de datos brutos.

2.3.Reconstrucción de señales termográficas

La reconstrucción de señales termográficas (TSR del inglés Thermographic Signal Reconstruction) es una técnica de procesamiento de imágenes termográficas que permite incrementar la resolución espacial y temporal de una secuencia, al mismo tiempo que reduce la cantidad de datos a manipular.

Está basada en la ecuación unidimensional de difusión de calor que describe la evolución de temperatura sobre la superficie de una placa semi- infinita después de haber recibido un estímulo térmico tipo Delta de Dirac:

$$T = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \quad (11)$$

donde t es tiempo, e es la efusividad térmica del material y Q es la densidad de energía sobre la superficie.

Esta relación puede ser escrita en una forma logarítmica de tal manera que la dependencia temporal de cada píxel pueda ser aproximada con un polinomio de la siguiente manera:

$$\ln[T(t)] = a_0 + a_1 \ln^2(t) + \dots + a_n \ln^n(t) \quad (12)$$

en donde $n + 1$ es el grado del polinomio.

La TSR entrega buenos resultados cualitativos, que permiten la detección de defectos y también permite el filtrado de ruido de alta frecuencia y la reducción de datos para el procesamiento, ya que la secuencia entera de imágenes termográficas puede ser reconstruida a partir de los coeficientes del polinomio usado para la regresión que por lo general es de orden bajo (4 a 7 dependiendo del contenido de ruido de la señal). Es decir, que una secuencia de 800 imágenes puede ser comprimida a 5 imágenes si se aplica la TSR con un polinomio de grado 4.

Adicionalmente, la TSR se puede usar para determinar la profundidad a la que se encuentra un defecto ya que los comportamientos logarítmicos de los píxeles que corresponden a un área defectuosa se alejan del comportamiento lineal (con pendiente -0.5) en un instante de tiempo determinado que está correlacionado con la profundidad del defecto (Figura 28).

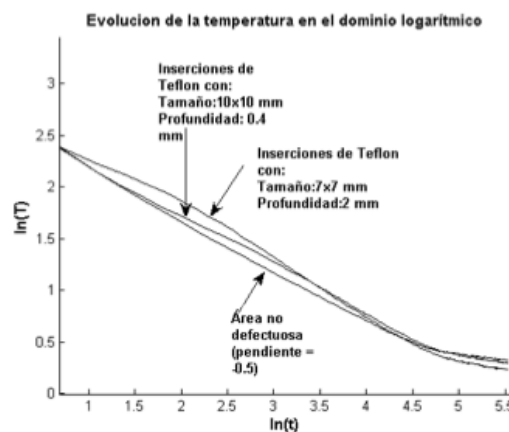


Figura 28. Evolución de temperatura en el dominio logarítmico en una muestra de compuesto (PFRC) con inserciones de Teflon a diferentes profundidades y con diferentes tamaños

2.4. Termografía de componentes principales

El procesado basado en componentes principales (del inglés Principal Components Thermography, PCT) ha sido usada para procesar secuencias de imágenes IR para extraer características y reducir la redundancia de datos.

Esto se consigue descomponiendo la variación temporal de la temperatura superficial de un objeto bajo excitación pulsada a través de la descomposición en valores singulares (SVD) y proyectándola en funciones más apropiadas que las oscilatorias empleadas en la PPT, que se ajustan mejor a la naturaleza monótonicamente decreciente de las señales producidas a partir del ETND.

Antes de aplicar la descomposición, la matriz 3D que representa la secuencia de imágenes IR debe transformarse en una matriz 2D. De esta forma, la SVD de la matriz A de $M \times N$ elementos (dónde $M > N$), está dada por la relación:

$$A = U \times R \times VT \quad (13)$$

donde R es una matriz diagonal de dimensiones $N \times N$ (valores singulares de A presentes en la diagonal), U es una matriz $M \times N$ y VT es la traspuesta de la matriz $N \times N$ (característica temporal).

2.5. Redes neuronales artificiales

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son un paradigma de procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas en una red que colabora para producir un estímulo de salida. Una red neuronal se compone de unidades llamadas neuronas. Cada neurona recibe una serie de entradas a través de interconexiones y emite una salida.

Son conocidas por su capacidad para realizar mapeos entre conjuntos de variables, su baja sensibilidad al ruido y sus capacidades de aprendizaje y generalización. Estas han sido empleadas en los últimos años como detectores de defectos y estimadores de parámetros de defectos en el ETND.

Se pueden emplear distintas arquitecturas, utilizando como entradas para estas redes curvas de evolución del contraste térmico respecto al tiempo, curvas de temperatura, el valor de las derivadas de las curvas de temperatura o curvas de fase y amplitud extraídas a partir de la PPT.

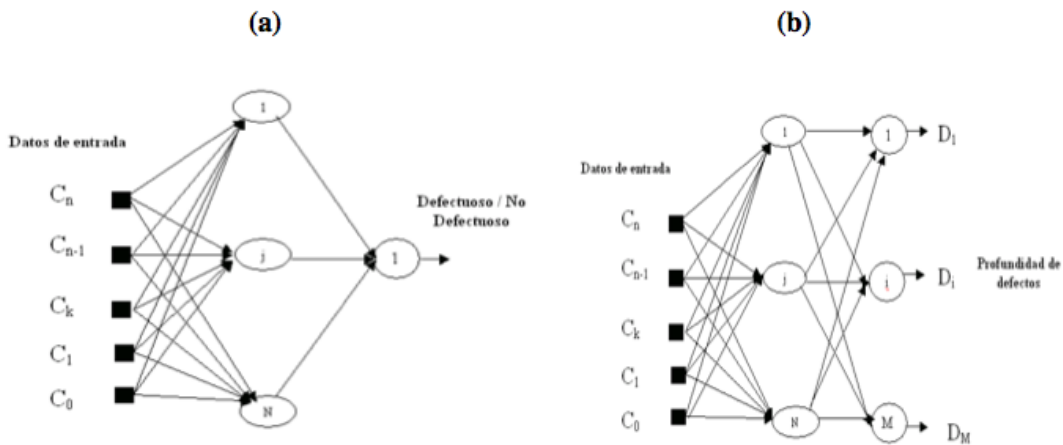


Figura 29. (a) Configuración detectora de defectos (b) Configuración estimadora de profundidad

La ilustración 29(a) corresponde a una configuración detectora de defectos en cuya salida se tiene una neurona que decide si el píxel analizado es ó no defectuosa dependiendo de un umbral.

Por otro lado, la ilustración 9(b) corresponde a una configuración estimadora de profundidad en donde la red se usa para mapear entre el espacio de entrada, definido por alguno de los tipos de datos mencionados anteriormente, y la profundidad de los defectos encontrados. Si se encuentra una zona no defectuosa esta se codifica como profundidad cero.

En general, se usan estas dos configuraciones en conjunto de tal manera que todos los píxeles son analizados inicialmente por la configuración detector y luego se presentan a la configuración estimadora sólo aquellos píxeles clasificados como defectuosos por parte del detector.

3. Post-Procesado

Además de los anteriores, se deben relacionar con la termografía todos aquellos procesados y tratamientos que permiten la extracción de información de las inspecciones realizadas. A continuación se explicarán los diferentes métodos de post-procesado.

3.1. Algoritmos de detección de defectos

La inspección visual por parte de un operador es la forma más comúnmente adoptada para la detección de defectos. Organizaciones de END en todo el mundo han emitido unas normas de certificación y calificación de expertos. Por ejemplo, la Sociedad Americana de Ensayos No Destructivos (ASNT) recomienda un nivel de certificación de capacidades en tres pruebas para el personal de infrarrojos (inspector termográfico nivel I, II y III). Sin embargo, diferentes métodos automatizados pueden ayudar a reducir la subjetividad y, en algunos casos, eliminar por completo la intervención humana en el proceso de detección.

Un método muy común es la umbralización. En él se establece un umbral de temperatura (en la imagen, un valor determinado de brillo) que se considera “normal”, considerando valores anormales por encima de este umbral.

Además existe un gran número de métodos de segmentación propios de procesado de imágenes en el espectro visible que pueden perfectamente ser adaptados para el infrarrojo. Como por ejemplo, operadores de detección de bordes como Sobel⁵ o Canny⁶ [2] en pre-procesado. Por ejemplo, la Figura 2 en pre-procesado muestra el

⁵ El Operador Sobel aplicado sobre una imagen digital en escala de grises, calcula el gradiente de la intensidad de brillo de cada punto (píxel) dando la dirección del mayor incremento posible (de negro a blanco). Además calcula el momento de cambio en esa dirección, es decir, devuelve un vector. El resultado muestra cuánto de abrupta o suavemente cambia una imagen en cada punto analizado, y a su vez en qué medida un punto determinado representa un borde en la imagen y también la orientación a la que tiende ese borde. En la práctica, el cálculo de la magnitud -que da nociones de un borde- es más sencillo que la interpretación de la dirección.

⁶ El Algoritmo de Canny es un operador desarrollado por John F. Canny en 1986 que utiliza un algoritmo de múltiples etapas para detectar una amplia gama de bordes en imágenes.

El algoritmo de detección de bordes de Canny utiliza un filtro basado en la primera derivada de una gaussiana. Ya que es susceptible al ruido presente en datos de imagen sin procesar, la imagen original es transformada con un filtro gaussiano. El resultado es una imagen un poco borrosa

resultado de una segmentación basada en el método de Canny para la detección de bordes. Para la segmentación en la Figura 2a se utiliza un diagrama de fase no filtrado. El resultado de segmentación es mucho mejor en la Figura 2b donde se utiliza un filtro gaussiano con varianza $\sigma=2$.

3.2. Métodos de inversión de la profundidad

Actualmente existen métodos para la inversión de la profundidad tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, además de los modelos estadísticos los cuales se desarrollarán en este apartado.

3.2.1. Contraste térmico

En el dominio del tiempo, la mayoría de las técnicas de inversión de la profundidad requieren de una etapa de calibración, ya sea con un modelo térmico o con varias muestras representativas de las desconocidas.

Por ejemplo, se puede calcular la profundidad del defecto z mediante la extracción de algunos parámetros en la curva de contraste térmico, tales como el contraste máximo ΔT_{max} y su tiempo de ocurrencia:

$$z = A t_{max}^{1/2} \Delta T_{max}^h \quad (14)$$

los parámetros A y h se han obtenido por regresión del proceso de calibración.

3.2.2. Frecuencia límite

En el dominio frecuencial, los métodos de inversión se basan en una relación directa entre la profundidad z , y la difusividad térmica μ , evaluada a la frecuencia límite f_b , siendo la frecuencia límite, aquella en la que el contraste de fase es suficiente para que un defecto sea visible.

La longitud de difusión térmica expresada por:

$$\mu = 2\alpha/\omega \quad (15)$$

respecto a la versión original. Esta nueva imagen no se ve afectada por un píxel único de ruido en un grado significativo.

El borde de una imagen puede apuntar en diferentes direcciones, por lo que el algoritmo de Canny utiliza cuatro filtros para detectar horizontal, vertical y diagonal en los bordes de la imagen borrosa. El operador de detección devuelve un valor para la primera derivada en la dirección horizontal (G_y) y la dirección vertical (G_x). A partir de éste, se pueden determinar el gradiente de borde y la dirección.

dónde $\alpha = k/\rho c_p$ es la difusividad térmica y $\omega=2\pi f$ la frecuencia angular; se puede utilizar para ajustar los datos experimentales de la siguiente forma:

$$z = C_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f_b}} + C_2 \quad (16)$$

Siendo C_1 y C_2 las constantes de regresión.

Se ha observado que, $C_1=1$ cuando se utilizan datos de amplitud, mientras que los valores obtenidos cuando se trabaja con la fase están en el rango $1,5 < C_1 < 2$. El problema de inversión en este caso, se reduce a la estimación de f_b a partir de la fase.

Un ejemplo de esto se muestra en la Figura D.3-3. Ésta presenta los perfiles de fase para los tres defectos marcados como A, B, y C. Los tres defectos se encuentran a la misma profundidad (1 mm) y poseen la misma área. Debido a que la difusión de calor es una función de la geometría de los defectos, la intensidad de la fase es diferente para los tres defectos. Sin embargo, la frecuencia límite f_b es la misma para los tres defectos, lo que permite realizar una cuantificación a través de la ecuación anterior.

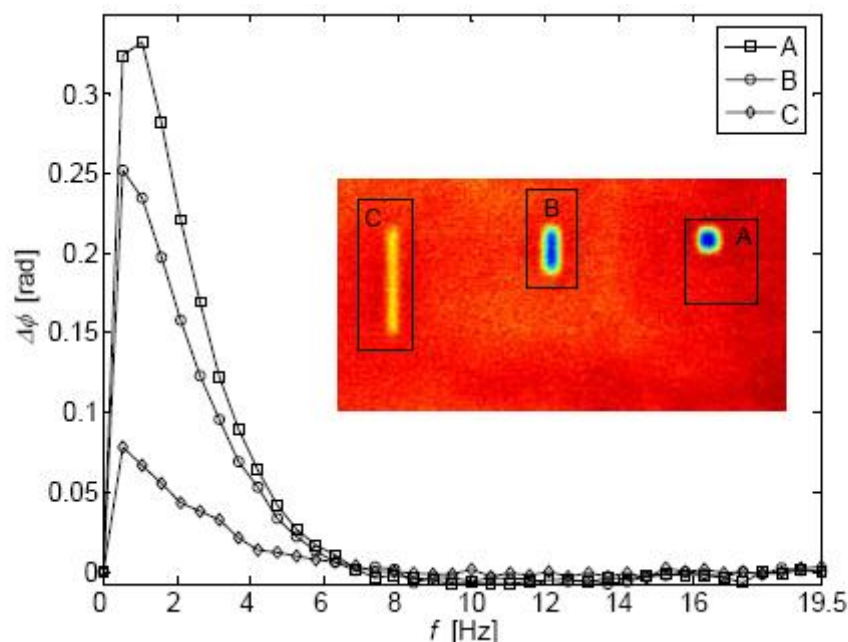


Figura 30. Curvas de evolución de la fase para diferentes regiones defectuosas

3.2.3. Modelos estadísticos

El comportamiento estadístico de las regiones de interés, tales como los fondos y los defectos también se aprovecha para la clasificación de profundidad. El punto de partida es que la temperatura, la fase y la amplitud se pueden modelar bajo algunas circunstancias (como en el caso de las fuentes de ruido "blanco") por un proceso aleatorio de Gauss⁷.

Primero se realiza una calibración o "fase de aprendizaje", en la que se dispone de imágenes con defectos localizados y de profundidad conocida, de manera que el medio m y la desviación estándar σ , se calculan en cada incremento de tiempo y para cada zona de interés. En la posterior etapa de análisis, los píxeles desconocidos se analizan y se calculan las probabilidades individuales de un píxel dado con m y σ , para ser parte de una clase dada. Suponiendo estadísticamente sucesos independientes, las probabilidades individuales (en diferentes incrementos de tiempo) se pueden multiplicar entre sí para formar una probabilidad global. De esta forma la regla es sencilla: la más grande gana.

3.2.4. Defectos de tamaño

Los defectos de tamaño normalmente se consiguen mediante la extracción del contorno de la anomalía detectada ya sea en la pendiente de contraste máximo o en un pico máximo de contraste térmico. Existe una técnica iterativa que consiste en extraer el contorno de cada imagen (contraste), de un tamaño la mitad de ancho que el máximo de la amplitud. Se establece una trama de tamaño función de la raíz cuadrada del tiempo y la línea extrapolada del momento inicial dará paso a una estimación del tamaño del defecto.

⁷ Proceso de Gauss: proceso estocástico que genera muestras en el tiempo de manera tal que no afecte la finitud de una combinación lineal que se distribuirá normalmente.

Capítulo 5 Usos y Aplicaciones de la Termografía

Como se ha descrito anteriormente la termografía infrarroja es un método de ensayo no destructivo muy flexible debido a que no implica ningún contacto entre la pieza a inspeccionar y el equipo que realiza la inspección. Por esta razón existen numerosas aplicaciones donde la termografía puede ofrecer importantes beneficios.

Se enumerarán los usos y aplicaciones que comúnmente se le dan a la termografía, y a continuación se hará el estudio detallado de algunas de ellas.

Usos y aplicaciones de la termografía infrarroja en estructura de edificios

- Inspección de pérdida de energía térmica para edificios (plantas, maquiladoras, hoteles, edificios gubernamentales, etc.)
- Evaluación de la humedad para edificios (plantas, maquiladoras, hoteles, edificios gubernamentales).
- Inspecciones en pisos sobrecalentados, localización de fugas y distribución de temperatura.
- Localización de aislamiento dañado o escaso.
- Identificación de pérdidas y fugas de energía.
- Localización de cables, conductores o tuberías sobrecalentados.



Figura 31: Ventana sin sellar

Usos y aplicaciones de la termografía infrarroja en sistema de techado

- - Detección de goteras para edificios y naves industriales.
- Identificación de partes de techos dañadas por el agua, rápida y eficientemente.
- Documentación de problemas antes de que las garantías u obligaciones expiren.

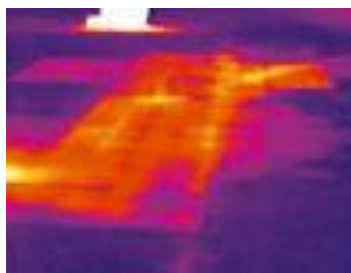


Figura 32: Tejado plano con filtración

Usos y aplicaciones de la termografía infrarroja en sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado

- Evaluación de equipos de aire acondicionado y calefacción.
- Pérdidas de frío en cuartos refrigerados.
- Detección de fugas en el aislamiento en equipos de refrigeración.

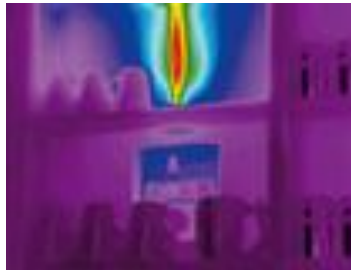


Figura 33: Calentador de gas construido muy cerca de la pared (riesgo de incendio)

Usos y aplicaciones de la termografía infrarroja en aplicaciones ambientales

- Localización de áreas de acumulación de desechos antiguos.
- Localización de tanques bajo tierra en zonas industriales.
- Localización de daños de arquitecturas y/o esculturas.

Usos y aplicaciones de la termografía infrarroja en energía eólica

- Comprobación de huecos y fallos de pegado en la estructura de la concha de la pala.
- Revisión de las palas en los parques eólicos comprobando que no hayan sufrido daños bajo condiciones climáticas adversas.
- Vigilancia de almacenamiento de material.

Usos y aplicaciones de la termografía infrarroja en energía solar

- Control del proceso de fabricación antes y después de la laminación de las células fotovoltaicas.
- Comprobación del intercambio de líquidos en las células térmicas.
- Mantenimiento de los huertos solares, verificando que no tienen ninguna célula muerta que disminuya el rendimiento del mismo.

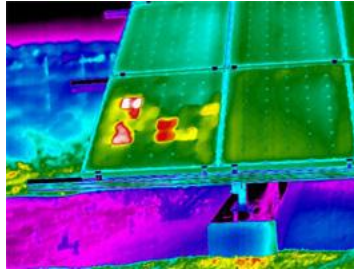


Figura 34: Células fotovoltaicas defectuosas en una placa solar

Usos y aplicaciones de la termografía infrarroja en aplicaciones aéreas

- Inspecciones de aéreas eléctricas de alto voltaje para líneas de transmisión.
- Búsqueda de supervivientes.

Usos y aplicaciones de la termografía infrarroja en Biología y Medicina

- Detección temprana de cáncer de piel.
- Técnica complementaria para el diagnóstico de cáncer de mama.
- Estudio y localización exacta de puntos de dolor, medida de los mismos y ayuda en su diagnóstico.
- Monitorización evolutiva de la efectividad de anestesia local en extremidades, y consecuente reducción de tiempo y riesgo.
- Localización rápida de patologías en músculos y huesos, y en sistemas cardiovascular o neurológico.
- Análisis de la condición funcional de los tejidos blandos lesionados para elegir el tratamiento mejor y más apropiado.
- Estudio de la implicación de raíces nerviosas en patologías, incluyendo nervios raquídeos.
- Valoración de gravedad de quemaduras.
- Evolución de injertos y úlceras.
- Cirugía de corazón abierto.
- Pruebas “cold stress”.
- Documentación objetiva sobre el tratamiento más adecuado en diversas dolencias.
- Medicina deportiva.

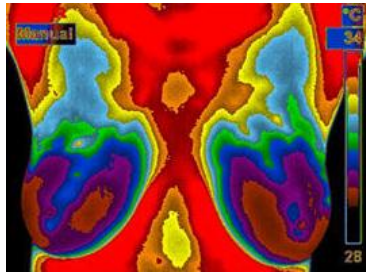


Figura 35: Informe vascular

Usos y aplicaciones de la termografía infrarroja en Radiometría

- Estudios de imágenes térmicas procedentes de objetos enterrados.
- Huellas térmicas de minas enterradas, etc.

Usos y aplicaciones de la termografía infrarroja en aplicaciones industriales

- Trabajos de conservación y restauración.
- Mantenimiento eléctrico.

Usos y aplicaciones de la termografía infrarroja en aplicaciones varias

- Localización de incendios de baja intensidad en bosques densos.
- Localización de personas perdidas
- Localización de personas atrapadas en incendios de edificios así como poder caminar a través del humo.

1. Aplicaciones de la Termografía en Edificios

El objetivo de la termografía en edificios es evaluar sus condiciones de aislamiento. Permite analizarlos térmicamente y detectar fallas de aislamiento, fugas de calor, y así mejorar la eficiencia energética del edificio.

La coyuntura actual, definida por un aumento constante del precio de los combustibles fósiles y por una preocupación creciente por las emisiones de CO₂ a la atmósfera y sus posibles consecuencias sobre el clima en nuestro planeta, hace que se ponga especial atención en el ahorro energético en el sector de edificación considerando la eficiencia energética y haciendo un uso racional de los materiales y recursos.

No solo criterios económicos y ecológicos provocan esta necesidad. Ante la exigencia de las normativas de los diferentes gobiernos, acuciados por los acuerdos internacionales, los criterios legales se han convertido en un factor importante para evaluar las condiciones de aislamiento de los edificios.

El factor clave sobre el que incidir es la forma en la que se construyen edificios y lo eficiente de su climatización, tanto en su calefacción como en su refrigeración. Sin embargo, la mayoría de emisiones provienen de edificios antiguos. Un edificio mal aislado necesitará mucha más energía para mantener la temperatura interior que otro con un adecuado aislamiento, tanto más cuanto mayor sea el gradiente de temperaturas respecto al exterior. En estos casos se produce un gran derroche en forma de pérdida de energía de manera ineficiente, y por ende, un gran derroche económico. Por lo tanto, mientras no se mejore la eficiencia energética de este conjunto de edificios no podremos hablar de una reducción sensible del consumo de energía en el sector de la edificación.

Puesto que a menudo no se dispone de detalles constructivos ni planos de instalaciones que permitan conocer con exactitud el edificio ya construido ni sobre qué puntos podemos incidir de manera más efectiva, mejorar su eficiencia energética requiere un estudio bastante laborioso.

En este contexto, la termografía puede ser tremendamente eficaz para conseguir grandes resultados. Precisamente, la termografía no tuvo un desarrollo importante hasta que se produjo la crisis energética de los años 70, cuando la necesidad de

reducir las pérdidas de calor en los edificios era una prioridad debido al alto coste de la energía necesaria para climatizarlos.

La termografía no solo permite comprobar la capacidad aislante de los materiales utilizados para tal fin, sino que también permite determinar la calidad del diseño y el montaje de los mismos. Las inspecciones, tanto en estructuras internas como externas, muestran la ubicación, la forma y el grado de protección de estos aislantes y la termografía permite además a los responsables documentar que han cumplido con la legislación vigente en este aspecto.

Hay varios factores que determinan la eficiencia energética de los edificios, sin embargo uno de los más destacados es la composición de fachadas y cubierta. Esta eficiencia energética, y por lo tanto el consumo de climatización, depende de las infiltraciones, los puentes térmicos o el estado de aislamiento.

Un aislamiento deficiente genera puentes térmicos, por los que se entienden aquellos puntos débiles existentes en los edificios desde el punto de vista térmico. En general, se crean en la unión de diferentes elementos estructurales (muros exteriores con forjados, pilares, carpinterías, ángulos, etc.) y su corrección exige técnicas constructivas específicas para cada caso. Suelen originar, además otros problemas como humedad, condensaciones, etc.

Otro punto débil en el aislamiento de edificios son las superficies acristaladas, que generalmente son los cerramientos a través de los cuales hay mayores fugas de calor. Para reducir estas pérdidas se suele recurrir al doble acristalamiento o a la doble ventana.

En la Figura 36 se observan dos ejemplos de imágenes termográficas de edificios:

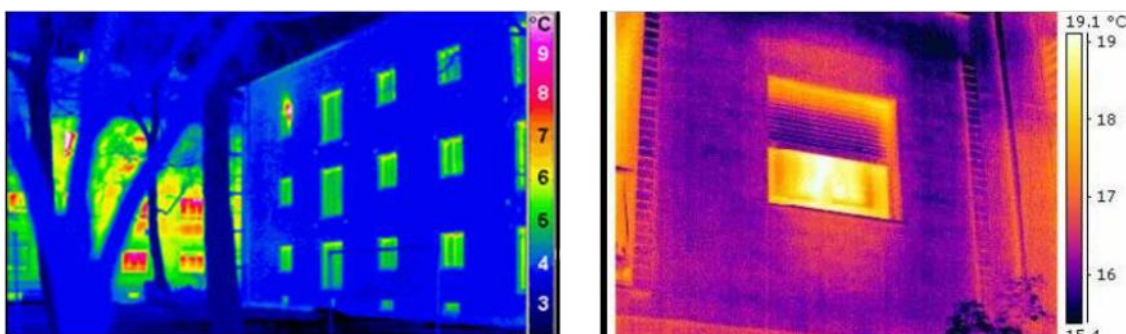


Figura 36. Termograma de la fachada de un edificio

En dichas imágenes se puede ver que las ventanas están a una temperatura superior a la de la fachada. Esto es habitual en invierno, ya que el nivel de

aislamiento no es el mismo y el flujo de calor a través del vidrio es superior al flujo a través de las paredes

1.1.Objetivos

El abanico de posibilidades que ofrece la termografía para el sector de la edificación es muy amplio:

- Análisis de las condiciones de aislamientos.
- Localización de humedad interna.
- Localización de ingreso de aire hacia el interior.
- Evaluación de puentes térmicos internos y externos.
- Localización de humedad externa.
- Localización de pérdidas de aire.
- Localización de filtraciones y humedad remanente en cubiertas en general.
- Evaluación del síndrome de la casa enferma.
- Localización de posible presencia de fisuras en paredes y techos.
- Ubicación de pérdidas de cañerías empotradas.
- Análisis de pavimentos.
- Control del proceso de secado en diversos materiales de obra, como soleras de hormigón, etc.
- Control e inspección de diversas instalaciones (electricidad, calefacción, refrigeración, etc.).

Las anomalías más importantes que se pueden determinar se presentarán, principalmente, en las paredes, ventanas y en la cubierta del edificio. Por otro lado, se pueden presentar anomalías de menor índole, pero que no se tendrán que despreciar, debidas, por ejemplo, a pérdidas energéticas por mal aislamiento en las canalizaciones de los sistemas de calefacción y aire acondicionado.

La mayoría de los defectos o deficiencias en las paredes se identifican como resultado de las diferencias en la relación de transferencia de calor de forma conductiva a través de la pared, también por calentamiento o enfriamiento debido

al flujo de aire convectivo, o a la combinación de ambos fenómenos. A continuación se mencionarán algunos de los defectos más típicos:

- Falta de aislamiento.
- Desplazamiento de aislamiento.
- Humedades.
- Puentes térmicos.
- Fugas de aire.

1.2. Factores que afectan a la medida

La localización e identificación de zonas de pérdidas de calor causadas por defectos de diseño o construcción, están basadas principalmente en el mapa térmico que ofrece una termografía. Este mapa se ve afectado de forma directa o indirectamente por una serie de factores que se recogen a continuación y que van a ser determinantes a la hora del análisis e interpretación de los datos obtenidos.

- Emisividad.
- Transmisión atmosférica.
- Temperatura ambiente.
- Temperatura atmosférica.
- Reflexión o absorción de radiación desde fuentes de calor naturales y artificiales.
- Procesos de convección.
- Efectos de presurización y despresurización mecánica del edificio

1.3. Metodología

A continuación, se mostrarán las pautas a emplear para la realización de una inspección termográfica, basadas principalmente en el seguimiento de la normativa ISO (International Organization for Standardization) y ASTM (American Society For Testing and Materials).

El inicio de una inspección termográfica sobre un edificio puede comprender los siguientes pasos que se citan a continuación:

- Información previa a la inspección termográfica del edificio y de los alrededores. Se deberán tener datos de:
 - los materiales de construcción del edificio (propiedades térmicas, emisividades, etc.).
 - datos sobre las condiciones meteorológicas del entorno (presión, temperatura atmosférica, humedad, velocidad y dirección de viento, temperatura ambiente) en las diferentes épocas del año.
 - planos del edificio para identificar los sistemas de calefacción, salidas de humos, aparatos de aire acondicionado, etc., que pudieran influir en el análisis e interpretación de los resultados.
- Las especificaciones y capacidades del equipo de termografía se deberán tener en cuenta para cumplir los criterios de resolución espacial (tamaño de píxel) y resolución térmica MRTD (Minimum Resolvable Temperature Difference).
- El sensor debe operar con una resolución espectral mayor de $2\mu\text{m}$ y deberá ser capaz de grabar imágenes en tiempo real con una resolución espacial lo suficientemente adecuada para poder detectar zonas mínimas defectuosas o zonas de posibles pérdidas.
- Determinación de la distribución de temperatura superficial de una parte del edificio. Esta distribución la pueden dar las termografías proporcionadas por el sensor infrarrojo previamente calibrado, y al que se le ha introducido los parámetros adecuados para una correcta lectura de la temperatura. A su vez se podrá instrumentar con termopares, también previamente calibrados, algunas partes de la zona a inspeccionar del edificio para tener datos de referencia de las superficies analizadas.
- Obtención y verificación de una zona de mal funcionamiento térmico, es decir, una zona donde se ha identificado alguno de los problemas que se buscan, como pueden ser: falta de aislamiento, fugas de aire, manchas de humedad, etc.
- Se deberán medir los parámetros atmosféricos, esto se deberá hacer 24 horas antes del comienzo de la inspección termográfica y durante la misma.

Tener en cuenta, por ejemplo, la presencia de lluvia antes de la inspección, ya que es importante que la cubierta esté en las condiciones adecuadas para la inspección. Al mismo tiempo la superficie a inspeccionar debería de estar libre de nieve, manchas de agua, escombros, etc. que pudieran impedir una adecuada inspección.

- Determinar inmediatamente antes de comenzar la inspección termográfica, las temperaturas en el interior y exterior del edificio.

Los ensayos en la cubierta es conveniente realizarlos de madrugada, ya que a esa hora es cuando se pondrán de manifiesto de forma más claras las posibles áreas defectuosas debidas a las observaciones que se han comentado en el punto anterior.

Basado en la norma ISO que se ha mencionado, un informe termográfico deberá contener la siguiente información:

- Descripción, lo más detallada posible del edificio a inspeccionar.
- Orientación geográfica del mismo y descripción de los alrededores (paisaje, vegetación, edificios, etc.).
- Descripción de los materiales utilizados en la construcción del edificio, así como datos de emisividad y características térmicas de los mismos.
- Especificación del equipamiento utilizado en el ensayo.
- Fecha y hora en la que se ha realizado la inspección, identificando claramente las zonas inspeccionadas.
- Medidas recogidas por los sensores de presión, temperatura, dirección y velocidad de viento, radiación solar y humedad atmosférica desde 24 horas antes hasta el final de la inspección.
- Cada termografía de la zona inspeccionada deberá ir acompañada de una fotografía de la misma para una total identificación.
- Análisis.
- Interpretación de los resultados del análisis.
- Conclusiones.

1.4. Identificación de defectos

A continuación, se expondrán algunas termografías tomadas en edificios y se comentarán algunos de los defectos encontrados.

1.4.1. Aislamiento (puentes térmicos y deficiencias de aislamiento)

La inspección termográfica de una fachada orientada al norte de un edificio de construcción reciente (Figura 37) permite detectar los puentes térmicos que constituyen los forjados, las cajas de persiana no aisladas y los balcones.

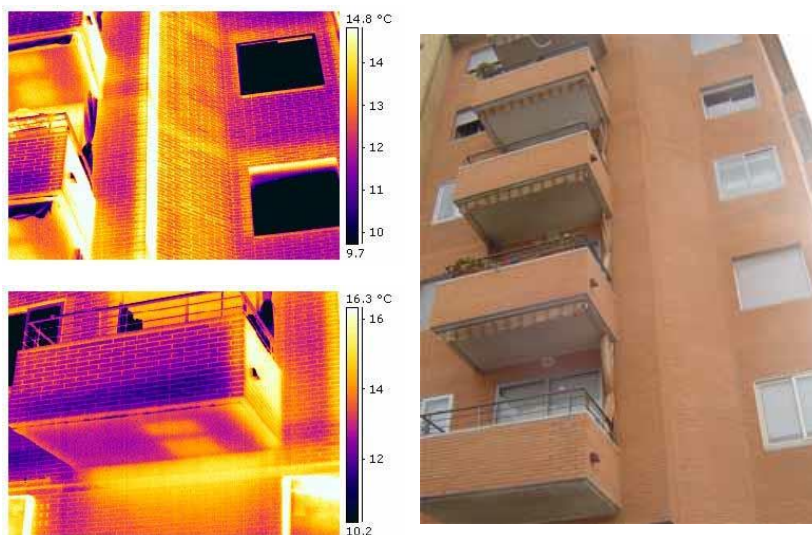


Figura 37. Termograma de la fachada de un edificio

La Figura 38 es la imagen termográfica de un falso techo en el que se detectan algunos paneles sin aislar. En este caso se trataba de la zona en la que no fue posible técnicamente colocar la manta aislante al cerrar el último panel.

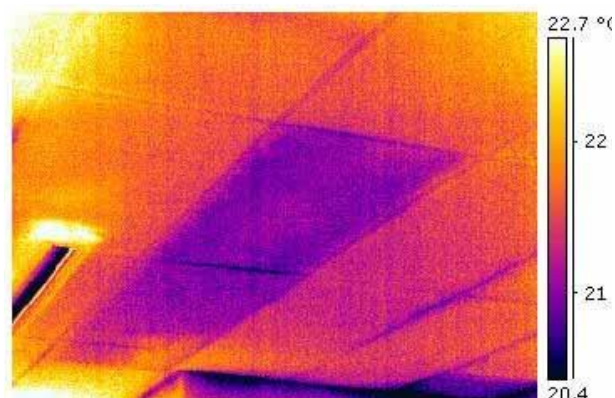


Figura 38. Termograma de un falso techo

1.4.2. Fugas de calor e infiltraciones de aire.

La parte de la cubierta es una zona muy crítica en la inspección termográfica ya que la superficie suele presentar muchos contrastes diferentes debido, principalmente, a cambios de materiales, repintado de zonas, suciedad, etc., que pueden hacer que una termografía sea mal interpretada.

Existen cubiertas que no están totalmente cerradas, en ellas se instalan en alguna ocasión claraboyas por motivos de luminosidad y diseño. Este tipo de cubiertas pueden también presentar problemas de pérdidas energéticas fundamentalmente en la zona de unión entre la cubierta y la claraboya, y a través del mismo material de ésta última como se puede observar en la termografía de la Figura 39.

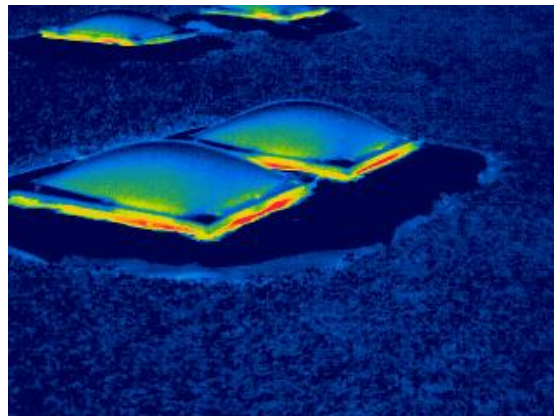


Figura 39. Claraboyas en la zona de la cubierta. Las columnas o pilares de muchos edificios pueden ser fuentes importantes de pérdidas de calor, y por ello se deberá poner especial cuidado a la hora del diseño y en la selección de los materiales.

En la Figura 40 se observan las infiltraciones de aire frío que se producen en una vivienda a través de las uniones entre techos y paredes, donde se rompe la continuidad del aislamiento, así como a través de los zócalos.

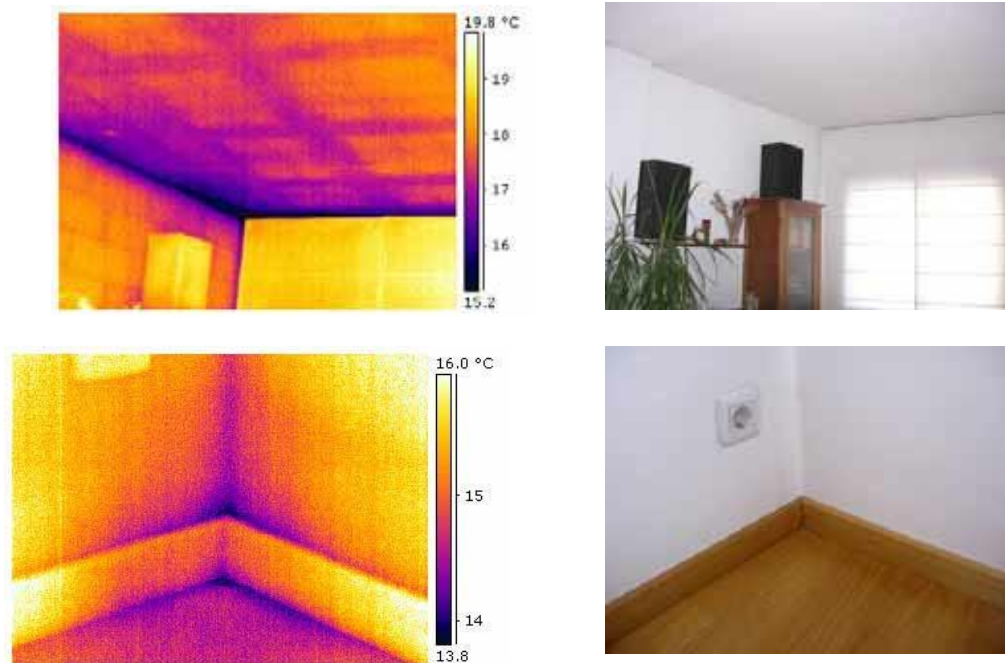


Figura 40. Infiltraciones de aire frío en una vivienda

La termografía también revela las pérdidas de calor o infiltraciones de aire a través de los marcos de las ventanas, las inserciones de los marcos en las paredes, o bajo las puertas, como en las imágenes de la Figura 41.

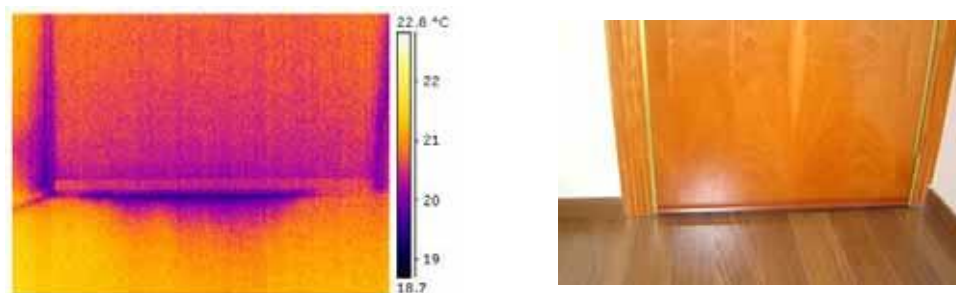


Figura 41. Termograma de una puerta

Las canalizaciones de los sistemas de aire acondicionado y calefacción muchas veces presentan problemas de aislamiento y son importantes las pérdidas térmicas que se producen en ellas. La termografía de la Figura 42 muestra este caso, en ella se identifican varios puntos como áreas de pérdidas, prácticamente a lo largo de toda la canalización.

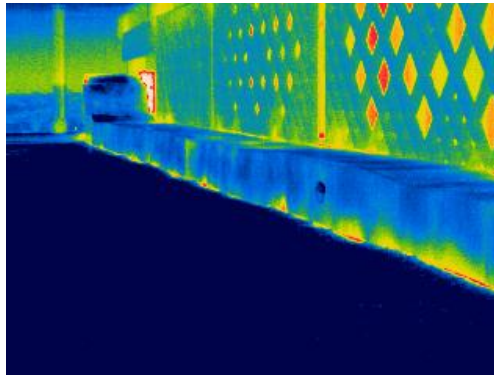


Figura 42. Pérdidas a través del tubo de canalización.

1.4.3. Detección de humedades y daños por agua.

La Figura 43 representa la comprobación de la presencia de humedad en un techo, que estaba provocando el levantamiento del yeso. Posteriormente se detectó la existencia de una ligera fuga en una conducción situada en la cubierta sobre la estancia en cuestión.

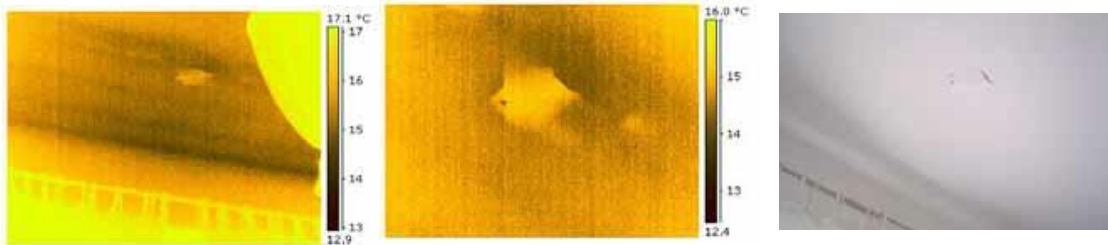


Figura 43. Termograma de un techo con humedad

Las propiedades térmicas del agua permiten detectar las humedades mediante termografía, sobretodo bajo unas determinadas condiciones ambientales.

1.4.4. Detección de materiales y estructuras

En la primera vivienda que se puede ver en la Figura 44 arriba, se detectaron las vigas (viguetas de hormigón) y en el segundo caso se puede visualizar el forjado reticular que forma la cubierta y los bloques que conforman el muro.

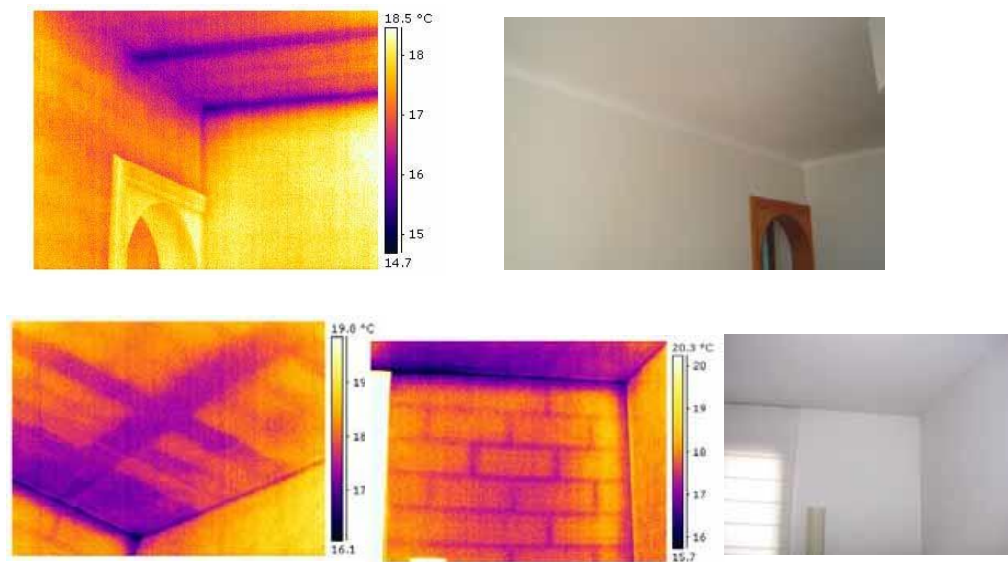


Figura 44. Termogramas de dos viviendas diferentes

Es posible detectar materiales estructurales, o cambios debidos a reformas y construcciones anteriores, si la diferencia de material supone una diferencia de temperatura en superficie.

2. Termografía en Aplicaciones Ambientales

Las aplicaciones del infrarrojo en el área de Medio Ambiente son básicamente llevadas a cabo con cámaras adaptadas para inspecciones aéreas (helicóptero - avión) o satelital.

Es claro que en muchos casos pueden utilizarse equipos a nivel del terreno. Dependiendo de la aplicación es la banda que uno debería elegir (NIR -MWIR - LWIR).

A continuación se detallan algunas de las aplicaciones ambientales de la termografía.

2.1. Localización de áreas de acumulación de desechos antiguos

En las últimas décadas la contaminación se ha convertido en un asunto de gran importancia ya que entre otros muchos problemas genera sustancias radiactivas

en el entorno. Esta contaminación puede proceder de radioisótopos naturales o artificiales.

Las fuentes naturales provienen de ciertos elementos químicos y sus isótopos. Son las responsables del 80% de la dosis recibida por las personas en el mundo, el resto proviene de fuentes médicas como los rayos x. Bajas dosis de radiación no son peligrosas, el problema ocurre cuando una persona está expuesta a estas dosis por un tiempo prolongado.

Existen muchos agentes contaminantes, como sustancias químicas, residuos urbanos, petróleo y sus derivados, radiaciones ionizantes. Todos estos producen muchas enfermedades y daños a la naturaleza. Además existen muchos contaminantes gaseosos que son generadores de las lluvias ácidas, el agujero en la capa de ozono y el calentamiento global.

Con las cámaras termográficas se puede rastrear acumulaciones de desechos antiguos que han sido abandonados o enterrados con el paso del tiempo detectando el calor que emiten estos mismos.

2.2. Localización de tanques bajo tierra en zonas industriales

Los tanques subterráneos de almacenamiento (Figura 45) se utilizan en muchos sectores de la industria para el almacenamiento de productos de petróleo.



Figura 45. Tanque subterráneo de almacenamiento

La filtración de las sustancias que almacenan estos tanques enterrados es causa de una creciente preocupación de seguridad pública y ambiental. Millones de tanques enterrados se han instalado en el mundo durante más de 60 años. Muchos de estos tanques están hechos de acero al carbón sin protección y pueden corroerse. Esta

corrosión penetra eventualmente en el tanque causando una filtración y los productos petroleros ingresan en la tierra. Esto puede dar origen a:

- Que vapores volátiles que ingresan a los sótanos y desagües ocasionando riesgos de salubridad y explosión.
- Que las filtraciones pueden introducirse y causar una contaminación considerable del agua subterránea.
- Que las filtraciones contaminarán el suelo y el agua de la superficie.

Sólo en Estados Unidos existe un estimado de 2.5 millones a 5 millones de tanques subterráneos. Más de la mitad de éstos contienen gasolina cuyos constituyentes químicos podrían incluir el plomo, benceno, tolueno, bibromuro de etileno, y bicloruro de etileno. Un estimado de un millón de tanques subterráneos tienen más de 16 años y alrededor de 700,000 se estiman estarían filtrando (aproximadamente el 25 %).

Si intentásemos descubrir la localización exacta de un tanque de almacenamiento subterráneo podríamos emprender la búsqueda con las cámaras termográficas y localizar el tanque. Si ese tanque desprendiese alguna sustancia toxica que emitiese una diferente temperatura contraria a la del ambiente podría llegar a detectarse que hay una fuga.

2.3. Detección de incendios forestales

La detección de los incendios forestales es fundamental a la hora de su extinción. Para ello se desarrollan técnicas complementarias a las ya existentes. Entre estas nuevas técnicas se encuentra la detección de incendios mediante cámara termográficas. Con ellas se pretende conseguir una detección temprana de los focos de incendios y que así pueda efectuarse su seguimiento, valiosa herramienta a la hora de la extinción.

2.3.1. Descripción del sistema

El sistema para la detección de incendios forestales mediante termografía, consta de cámaras térmicas y cámaras CCTV (Circuito Cerrado de Televisión). Las cámaras (Figura 46 -2 y 3) se encuentran instaladas en una torre metálica (Figura 461), sobre una plataforma (Figura 46-2), mediante una pieza que soporta a ambas

(Figura 46-4). Acompañando a este sistema de vigilancia se instala también un sistema de georreferenciación y los equipos necesarios para la transmisión de la información por control informático.

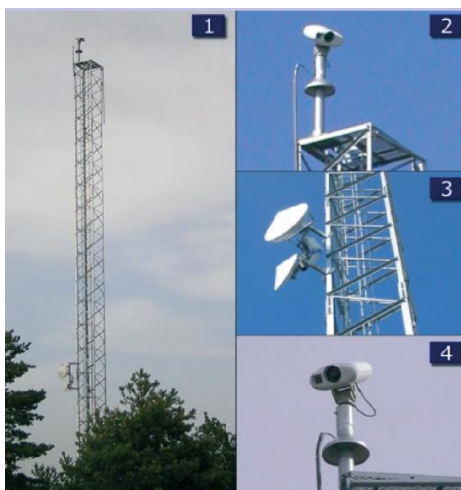


Figura 46. Sistema de vigilancia

Estas torres están dotadas de un cámara dual (visión térmica y visión normal), la cual se encuentra en estado de observación de forma continua y en labores de rastreo perimetral de 360°.

El sistema permite la rápida detección de incendios en entornos remotos que difícilmente pueden ser localizados en tiempos razonables mediante la simple visualización. Y puede hacerlo incluso cuando las condiciones meteorológicas son adversas. Así, en situaciones de niebla densa, humo u oscuridad, el sistema continúa operativo, ya que las cámaras infrarrojas no ven mermadas su capacidad de trabajo en tales situaciones. Cuando el sistema detecta alguna anomalía, que vendrá dada en forma de un aumento de la temperatura, la cámara que la ha generado capta desde ese instante imágenes concretas de la alarma, las transmite y las almacena de forma automática, por si posteriormente han de ser consultadas.

Es entonces cuando el responsable del sistema puede tomar el mando del mismo por control remoto, localizar la imagen, fijarla y ver el posible incendio forestal en tiempo real. Es posible conectarse también con las cámaras CCTV y térmica para controlarlas. Esto permite observar la ubicación de una alerta, comprobar el área de visibilidad de la cámara y los parámetros que mejoren la visión de la cámara térmica en un incendio, así como distinguir el foco de inicio y la evolución del mismo. Además, el sistema facilita las labores de extinción gracias al seguimiento

térmico y en directo de las diferentes áreas del incendio, de los puntos calientes que deja atrás (tocones), así como su georreferenciación cartográfica. También permite efectuar un seguimiento de las cuadrillas y otros medios que se encuentran en labores de extinción, de manera que se puede orientar el desarrollo de los trabajos a la vez que se convierte en un apoyo de gran valor a la hora de velar por la seguridad de las personas que en ese momento se encuentran en el siniestro.

En la Figura 47, se observa una imagen obtenida con el sistema de seguridad descrito.

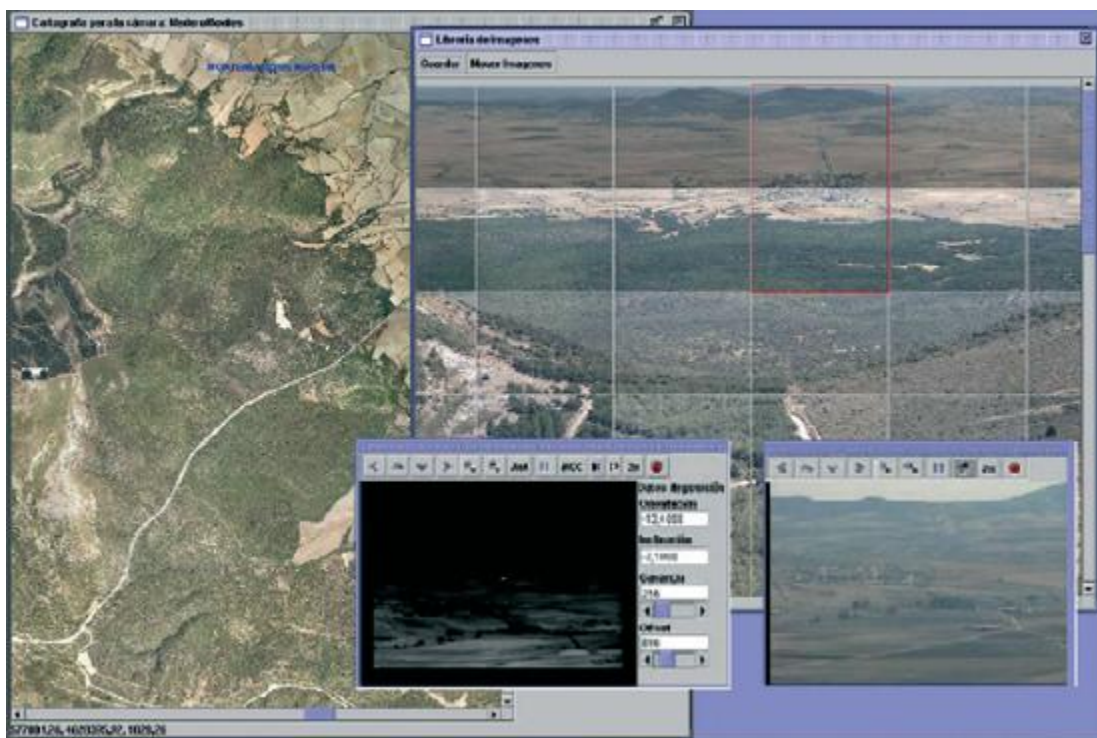


Figura 47. Imagen aérea de un terreno con peligro de incendio

2.4. Control de la Calidad del Aire

Mediante la termografía es posible garantizar la calidad del aire o el funcionamiento correcto de los sistemas internos de eliminación de químicos. Además, se pueden detectar docenas de componentes orgánicos volátiles (COV), que podrían pasar desapercibidos. Por ejemplo en una planta de fabricación de neumáticos, una fábrica de materias primas plásticas o una empresa de gas natural, la termografía infrarroja detectaría un gas en particular y lo proyectaría como una nube de vapor o humo en la pantalla de la cámara.

2.5. Otras Aplicaciones Ambientales

Además de las aplicaciones anteriormente descritas, la termografía infrarroja se aplica para:

- Asentamiento de basurales
- Asentamiento y control de plantas de energía & industrias
- Avalúo del hábitat de las faunas
- Control de la deforestación
- Control de polución del agua
- Control de descarga de efluentes en sistemas de desagüe
- Control de descarga de efluentes en canales de agua potable /ríos /mares/lagos
- Control de descarga de efluentes en drenajes de agua de lluvia
- Control de descarga de gases calientes a la atmósfera (chimeneas)
- Controlar efectos medioambientales ocasionados por de hombre
- Derramamientos de aceites & rastros de contaminantes
- Determinación de modelos de la turbiedad & circulación en zonas costeras
- Determinación de los efectos de los desastres naturales
- Erosión de las playas
- Evaluación de inundaciones y deslizamientos de tierra
- Mapeo de las características espectrales de los espejos de agua
- Medida de rasgos de los glaciares
- Medida del sedimento & modelos de la turbiedad del agua
- Meteorología
- Procesos de seguimiento del derretimiento de la nieve
- Riesgos medioambientales
- Temperatura de los océanos

3. Termografía en Energía Eólica

Al igual que en la energía solar el mantenimiento predictivo y preventivo de los aerogeneradores eólicos es muy importante. Tiene como objetivo la reducción de costes de intervención y movilización de las turbinas eólicas. Gracias al mantenimiento preventivo, las paradas de mantenimiento se programan y optimizan con el fin de intervenir en piezas antes de que se produzca una avería. Además las paradas de producción de energía eólica se anticipan para reducir su duración y sus costes.

Una de las tareas fundamentales en el mantenimiento predictivo y preventivo de los aerogeneradores eólicos es el análisis termográfico de los mismos. Mediante la termografía se pueden identificar fuentes de energía infrarroja emitida por la turbina eólica. Esta técnica permite realizar inspecciones sin interrumpir la producción de electricidad eólica, a distancia y con toda seguridad. Permite detectar sobrecalentamientos anormales de los elementos mecánicos y eléctricos y paliar el incidente de manera preventiva.

3.1. Aerogeneradores

Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento (turbina eólica). La energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.



Figura 48. Aerogenerador de eje horizontal

Los aerogeneradores se pueden clasificar en dos tipos diferentes en función del eje sobre el que gira la turbina. Los aerogeneradores de eje horizontal son los más comunes (Figura 48), son aquellos en los que el eje de rotación del equipo se encuentra paralelo al piso. Los aerogeneradores de eje vertical son menos frecuentes. En éstos, el eje de rotación es perpendicular al piso. Los aerogeneradores también se pueden clasificar según la localización en la que se usan, *onshore* si están situados en tierra y *offshore* en el mar.

En la Figura 49 se muestran las diferentes partes de un aerogenerador de eje vertical.

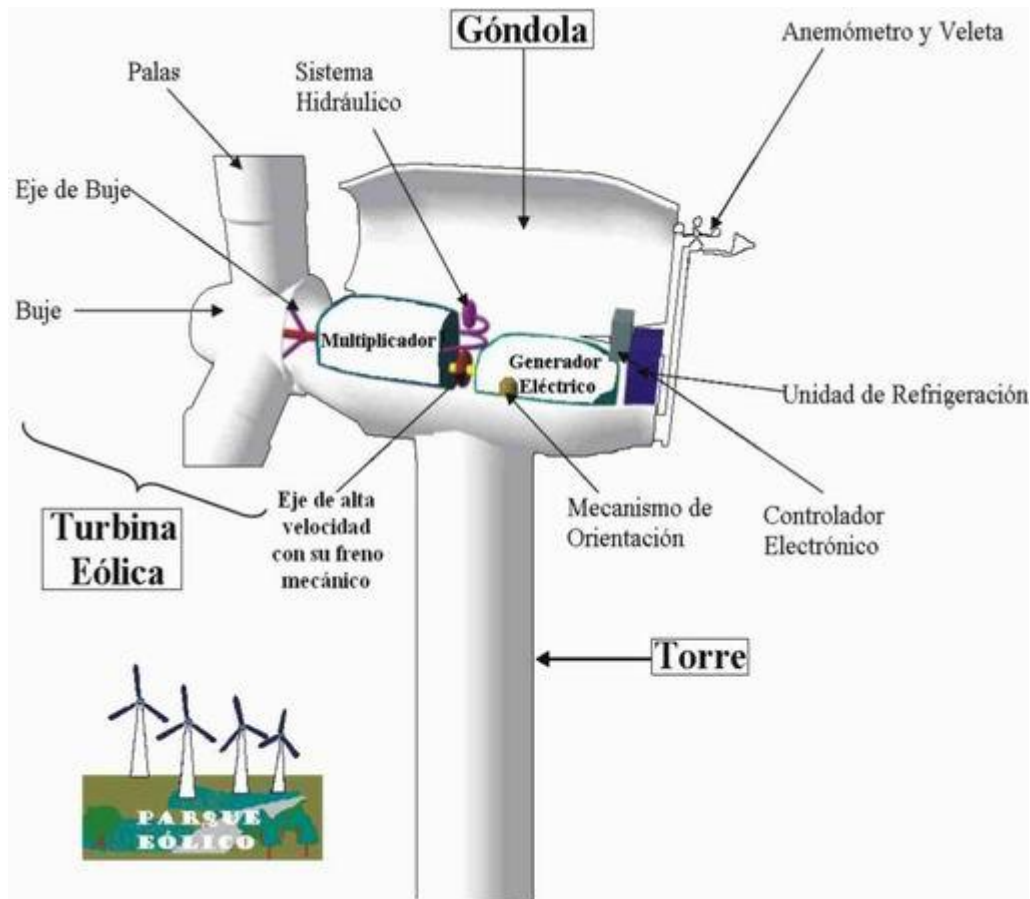


Figura 49. Aerogenerador de eje horizontal

3.2. Objetivos

Los defectos de fabricación pueden causar problemas durante el funcionamiento normal. Por ejemplo, las palas pueden desarrollar grietas en los bordes, cerca del centro o en las puntas (figura 2). Por ello, las palas del rotor de fibra de vidrio se consideran como el elemento más vulnerable de la turbina eólica (2).

Los defectos de fabricación en las palas del rotor se pueden resumir en delaminaciones (figura 3), fallas adhesivas y zonas pobres de resina.

A continuación se enumeran algunos defectos específicos en zonas concretas:

- Piel / adhesivo: se trata de una mala cohesión entre la piel del laminado y el epoxi⁸ o que el epoxi falta.

⁸ Resinas epoxídicas: tipo de adhesivos estructurales o de ingeniería. Sirven para pegar gran cantidad de materiales y se utilizan en la construcción de aviones, automóviles, bicicletas, esquís.

- Adhesivo / larguero principal: esto es cuando no hay cohesión entre el adhesivo y el larguero principal.
- Delaminación en el larguero principal.
- Amortiguación alta en la piel o larguero laminado principal, que podrían ser causados por la porosidad o el cambio del espesor del laminado.

3.3. Metodología

Una de las partes más importantes de un aerogenerador es la turbina eólica. Las turbinas eólicas incorporan muchos componentes mecánicos y eléctricos diferentes. Como los de cualquier otro equipo, estos componentes son vulnerables al desgaste y se pueden romper. Esto no sólo puede provocar costosos tiempos de inactividad, sino también accidentes peligrosos.

En la Figura 50 se muestran las diferentes partes de una turbina eólica.

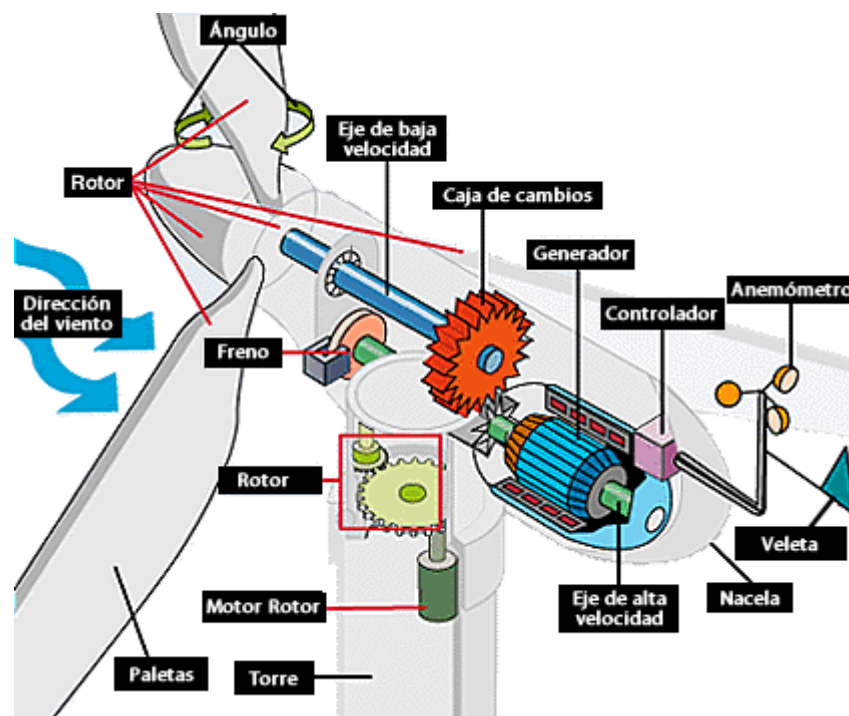


Figura 50. Turbina eólica

3.3.1. Inspección termográfica de las palas del rotor

La pala del rotor es la parte principal de la turbina eólica. Es una construcción de peso ligero que tiene que soportar cargas pesadas de viento y condiciones climatológicas duras. Hoy en día, la mayoría de las palas están hechas de dos

carcasas de fibra de vidrio reforzadas con plástico y pegadas entre sí. Generalmente, por razones de rigidez, se introducen diferentes tipos de mástiles dentro de la pala. Las juntas de esta unión son las partes potencialmente defectuosas o débiles de la construcción.

Durante su vida útil, las palas del rotor sufren diferentes cargas debido a las fuerzas gravitatoria, centrífuga y aerodinámica. Además sufren diferentes situaciones de estrés que pueden provocar varios tipos de fallos, como delaminaciones o grietas. Para evitar los fallos, las palas han de ser inspeccionadas regularmente mediante pruebas no destructivas.

Las juntas de adhesión son puntos críticos en la estructura de la pala por lo que su inspección ha de realizarse con especial cuidado. Los escáneres infrarrojos se usan para examinar la pala en toda su longitud, midiendo exactamente los mismos puntos cada vez y detectar delaminación y microfracturas. La técnica más comúnmente usada en estos casos es la termografía de pulso (ver capítulo Procedimientos de Obtención). El escáner puede ver a través del laminado y examinar la junta adhesiva. Graba las diferencias de temperatura en el adhesivo, identifica posibles fallos y toma una serie de fotografías. Si hay alguna duda en algún punto, se puede señalar para analizarlo posteriormente usando procesamiento de imágenes. Si se encuentra algún fallo, casi siempre puede ser reparada inmediatamente.

La termografía infrarroja tiene el potencial de proveer técnicas de campo completo y sin contacto para la inspección de la turbina eólica. Para su aplicación a las palas de la turbina, la sensibilidad de la imagen térmica ha demostrado ser adecuada para el examen no destructivo durante las pruebas de fatiga, además, se cree que para palas in situ, las condiciones de carga de viento pueden ser suficientes para crear efectos detectables por imágenes térmicas.

Las cámaras usadas en estos casos han de ser lo más compactas posibles ya que las turbinas eólicas se encuentran a gran altura. Además el reducido espacio en la turbina eólica hace que no se tenga distancia suficiente para capturar partes más amplias de una vez por ello las lentes de gran angular ofrecen grandes ventajas.

3.3.2. Identificación de los defectos

La observación de la pala del rotor, desde el interior o desde el exterior, durante o poco tiempo después del proceso de producción o durante la reparación, dará mucha información acerca de los posibles defectos internos. A continuación se muestran unos ejemplos.

Inspecciones Pasivas

Ejemplo 1:

La siguiente imagen (Figura 51) muestra la cámara infrarroja durante una campaña de medición, observando el interior de la pala del rotor, todavía caliente. La imagen termográfica (Figura 51) muestra la distribución de temperatura dentro de la pala del rotor poco tiempo después de pegar entre sí las dos conchas que estaban separadas.

Los defectos que se producen durante el encolado se pueden observar desde el exterior de la pala, ya sea en el borde de ataque (Figura 51 abajo) o en el borde de salida.

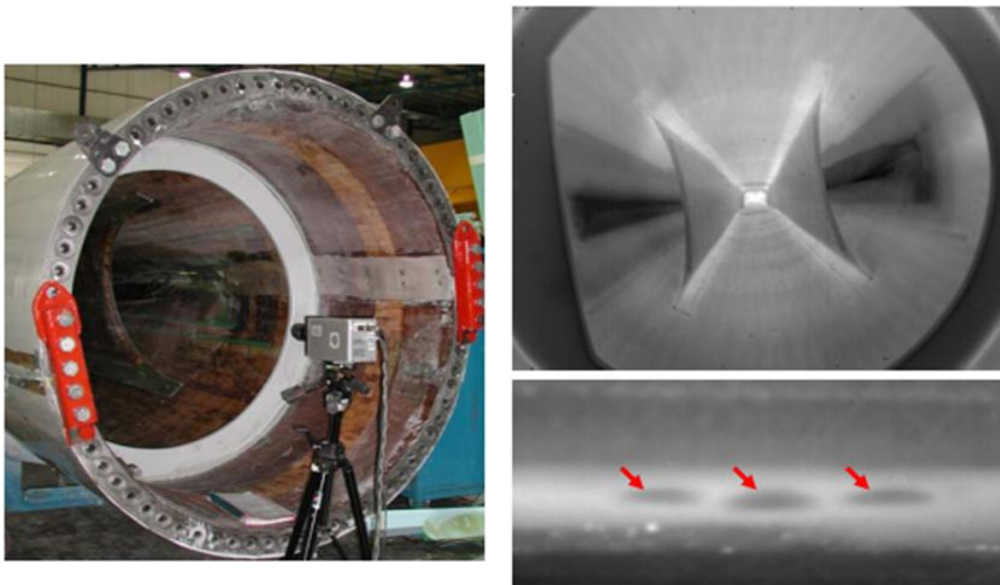


Figura 51. Inspección pasiva de la parte interna de la parte interna de una pala de rotor con una cámara termográfica (izq.). Imagen termográfica de la parte interna de la pala del rotor (arriba dcha.). Defectos del encolado observados desde el exterior (abajo dcha.)

Ejemplo 2:

Los cambios fuertes de presión de viento y aire producen un gran impacto sobre el material laminado de las palas del rotor. Tienen una especial influencia las cargas cíclicas que afectan al material produciendo grietas y aparecerá un proceso de degradación continuo que afectará a las palas.

Frecuentemente, los cambios de las cargas producen diferencias de temperatura en las palas durante la rotación, indicando gran estrés o liberación de estrés en diferente áreas de la pala (Figura 52).

Además de la distribución de tensiones, las pequeñas grietas y el laminado en seco va a producir calor por fricción debido a la excitación cíclica (fig. 7).

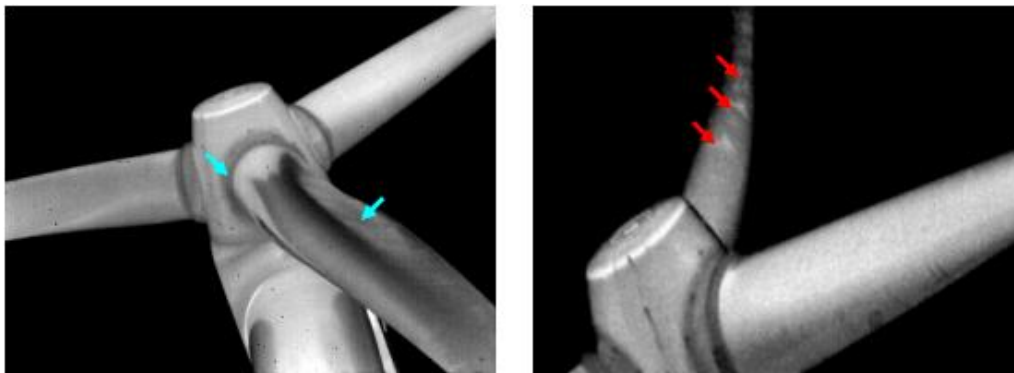


Figura 52. Imagen térmica de una pala de rotor mientras se está moviendo. Las partes de mayor brillo son las partes más calientes y muestran la acumulación de calor debido a las cargas mecánicas (flechas azules). En la imagen de la derecha las partes de mayor brillo indican delaminaciones producidas por el calor producido por la fricción de las microgrietas (flechas rojas)

Inspecciones Activas

Las técnicas de termografía activa se pueden usar en tres etapas diferentes:

- En el taller de acabado durante el proceso de producción, usando un sistema de inspección móvil sobre un raíl.
- En el área de pruebas, usando una cinta transportadora.
- In situ, antes de la instalación de las palas del rotor en la turbina.

A continuación se muestran algunos ejemplos:

Ejemplo 1:

Después de pegar las dos medias conchas, la pala del rotor tiene que someterse a un trabajo de acabado en el que se retira el pegamento extra, se pinta y se llevan a cabo una serie de inspecciones acústicas. En esta etapa la inspección acústica, también llamado método de percusión o golpeo para la detección de defectos, se puede sustituir por la técnica infrarroja ya que se ahorra tiempo. Al mover el sistema de inspección sobre un sistema de raíles a lo largo de la pala del rotor (fig.), se pueden detectar diversos fallos.

Uno de los principales defectos es la filtración de aire durante la inyección de pegamento en vacío. Si se introduce demasiado aire en la fibra de vidrio, las burbujas de aire pueden crear grandes áreas de laminado débilmente unido (Figura 53).

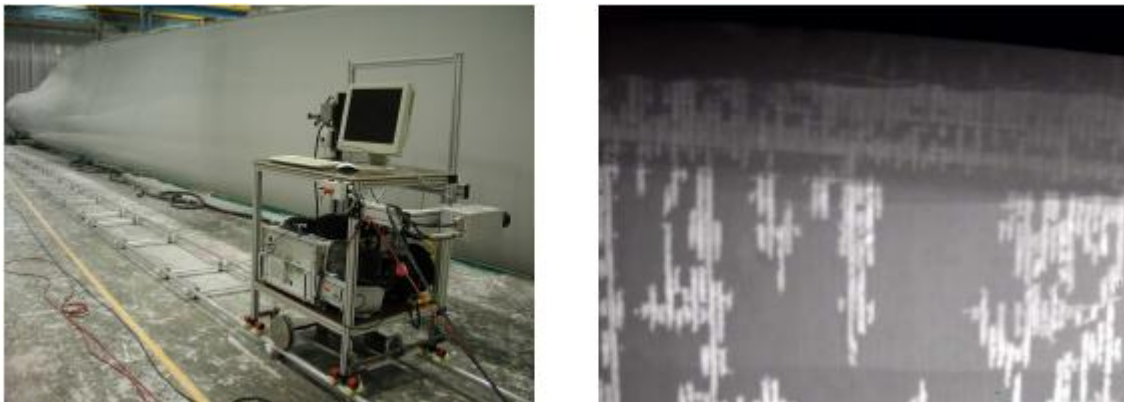


Figura 53. Sistema de termografía activa sobre raíles para la inspección de estructuras largas (izq.). Defectos de delaminado por filtraciones de aire en la fibra de vidrio (dcha.).

Ejemplo 2:

Las piezas rotas o las muestras pequeñas de una pala de rotor se pueden colocar sobre una cinta transportadora. Moviendo el material a lo largo del radiador infrarrojo, la superficie se puede calentar algunos grados. Después, el material se mueve bajo la cámara infrarroja para una inspección térmica (Figura 54). Defectos como delaminaciones pueden ser detectados como puntos calientes, mientras que los mástiles de los refuerzos aparecen como zonas frías (Figura 54).

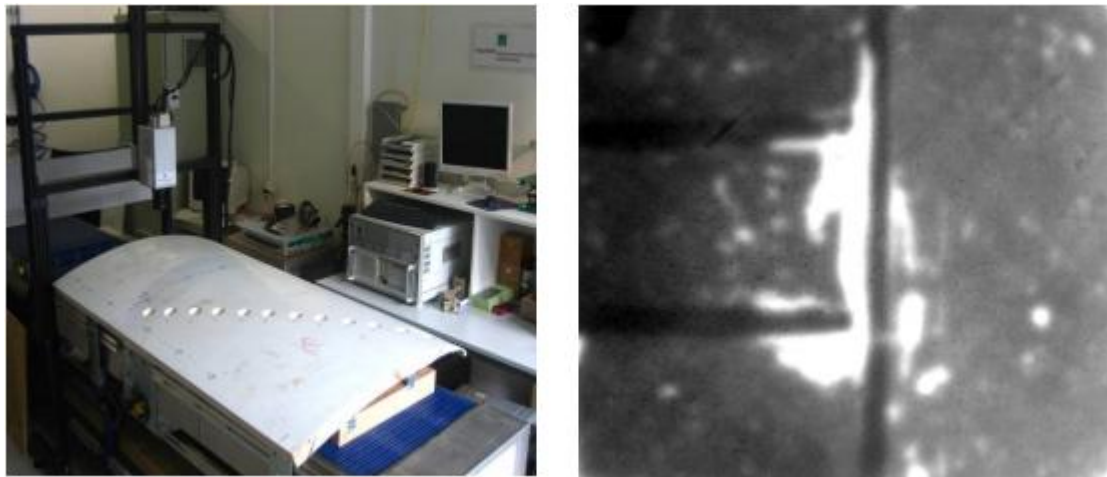


Figura 54. Sistema de pruebas de laboratorio sobre una cinta transportadora (izq.). Imagen térmica de una muestra de prueba que muestra delaminaciones en los puntos con más brillo (dcha.)

4. Termografía en energía Solar

En la última década, la demanda creciente de energía ha estimulado la aparición de fuentes de energía alternativas al petróleo. De esta forma se han desarrollado diferentes tecnologías que tratan de utilizar energías renovables, como el viento, las mareas o la radiación solar.

La utilización de la radiación solar para generar electricidad a través de sistemas fotovoltaicos ha tenido un desarrollo espectacular en los últimos cinco años. Este desarrollo se ha debido a diferentes aspectos entre los que podemos destacar tanto la madurez de esta tecnología como el incentivo económico proporcionado por parte de los estados. En cualquier caso, el hecho es que este desarrollo ha supuesto la aparición de muchas empresas dedicadas al desarrollo, instalación y gestión de parques o huertos solares.

Evidentemente estas instalaciones tienen que proporcionar un retorno de la inversión adecuado para hacerlas rentables, aspecto que va a estar condicionado entre otros factores por un perfecto funcionamiento de dichas instalaciones o, lo que es lo mismo, un rendimiento óptimo de toda la planta, máxime cuando el coste de la electricidad de origen solar es más elevado que el coste logrado con otras tecnologías más convencionales.

4.1. Instalaciones fotovoltaicas

Una instalación fotovoltaica (Figura 55) está compuesta básicamente por sistemas de paneles fotovoltaicos instalados en estructuras adecuadas, equipos inversores que convierten la tensión continua generada por los paneles solares en tensión alterna, los sistemas de orientación de los paneles en función del tipo de instalación, el cableado y los sistemas de protección, así como los elementos de media tensión asociados en caso de que el sistema se conecte a una red comercial. Todos estos elementos forman un sistema cuyo correcto funcionamiento va a proporcionar el retorno de la inversión en el periodo calculado.

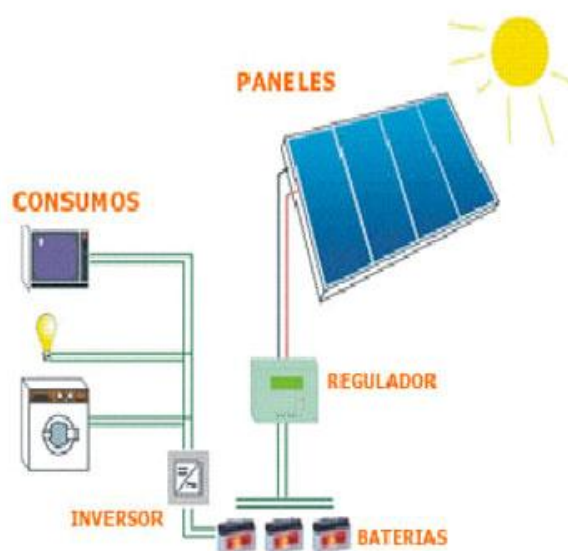


Figura 55. Instalación fotovoltaica

4.2. Paneles fotovoltaicos

El sistema de paneles fotovoltaicos está constituido por paneles (Figura 56) o módulos que contienen celdas basadas en semiconductores sensibles a la radiación solar, encargadas de generar la tensión CC. La tecnología de estas células fotovoltaicas puede variar, destacando tecnologías como la de silicio policristalino, de película delgada, telururo de cadmio o arseniuro de galio (GaAs), cada una con sus rendimientos específicos.



Figura 56. Panel fotovoltaico

Estas células se agrupan en el panel en una o varias series en paralelo para lograr la tensión y potencia deseada. En condiciones normales de funcionamiento cada célula fotovoltaica, al recibir la radiación del sol, genera una tensión que al sumarse con el resto de las células en serie proporciona la tensión de salida del panel, que alimentará al inversor para generar la tensión alterna de salida.

La relación entre la tensión y la corriente proporcionada por la célula viene dada por su curva característica I/V (ver Figura 57). En el caso de que la célula esté sometida a radiación solar el valor de $I \times V$ será mayor que cero, es decir se generará electricidad.

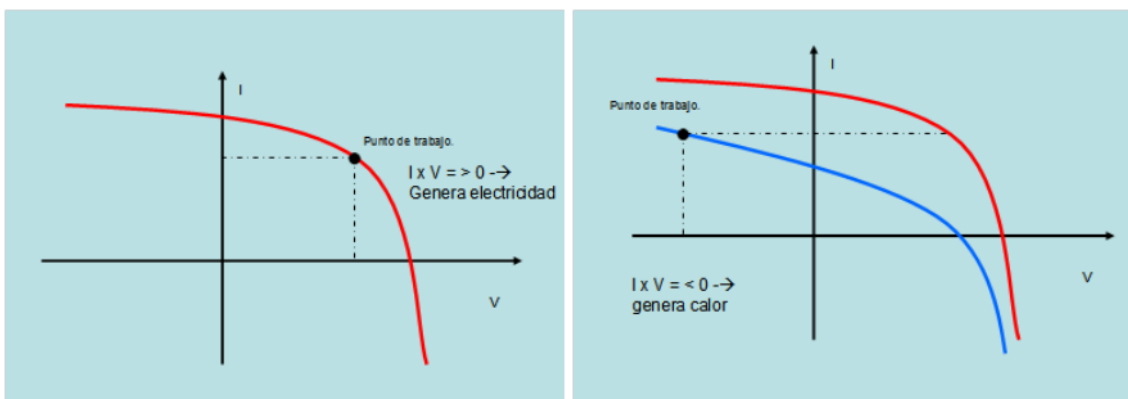


Figura 57 Célula irradiada por el sol (Izq.) Célula no irradiada o en fallo (Dcha.)

Sin embargo, cuando una celda está averiada o no genera energía porque no recibe la radiación del sol, se puede polarizar de forma inversa pasando a comportarse como una carga en vez de un generador, lo cual puede implicar una alta disipación de calor. Esta situación es fácilmente detectable si se utilizan técnicas termográficas.

4.3. Objetivos

Realizando una comprobación visual del campo fotovoltaico, es posible detectar algunos de los posibles defectos que se pueden desencadenar en una instalación fotovoltaica. Pero la mayoría de ellos no son visibles con una simple inspección ocular y en algunos casos resulta difícil localizarlos mediante monitorización. La combinación de un estudio termográfico y la caracterización de las series o módulos para obtener los parámetros característicos de los mismos puede dar una visión más clara de los defectos existentes. De esta forma, los problemas típicos que la termografía puede detectar son:

- Coloración del encapsulado
- Hermeticidad de la caja de conexión
- Delaminación del encapsulado
- Células o módulos en cortocircuito
- Degradación del sellado
- Células o módulos en circuito abierto
- Oxidación del mallado de las células
- Suciedad o sombreado parcial
- Oxidación de los terminales
- Rotura del cristal del módulo

4.4. Metodología

4.4.1. Inspección de Paneles Solares

La forma de proceder para realizar un análisis termográfico en paneles solares, que pueda detectar los fallos anteriormente descritos, ha de ser mediante una cámara termográfica.

La cámara va a capturar una imagen térmica totalmente radiométrica junto con una imagen de luz visible superponiéndolas píxel a píxel con diferentes grados de fundido. La imagen así obtenida va a mostrar, por un lado las temperaturas de la

superficie de los paneles fotovoltaicos a través de una paleta de colores que presentará las diferentes temperaturas. Además se representará una imagen de luz visible que facilite la identificación de los elementos. Gracias a la imagen térmica podremos ver el sobrecalentamiento de las celdas defectuosas.

Las condiciones más favorables para la detección de este tipo de problemas serán aquellas en las que el panel proporcione la máxima potencia, normalmente al mediodía en un día despejado. En estas circunstancias se pueden encontrar celdas a temperaturas muy elevadas.

La inspección de paneles fotovoltaicos con una cámara termográfica se puede realizar tanto desde la parte frontal como desde la parte posterior del panel. En este último caso se presenta la ventaja de que se evitarán problemas relacionados con reflejos solares o aquellos derivados de la baja emisividad asociada a la superficie cristalina del panel.

En cualquier caso, la termografía nos va a permitir identificar a distancia y de una forma muy rápida los paneles que presentan puntos calientes. Simplemente tendremos que hacer un barrido de la instalación con la cámara termográfica.

Para tratar de evitar los problemas asociados a la polarización inversa de las celdas, los módulos fotovoltaicos pueden incluir diodos de protección (bloqueo, anti-retorno o by-pass), los cuales van a disipar más potencia cuanto mayor sea el número de células defectuosas. Este calentamiento podrá ser detectado también con el uso de la cámara termográfica revisando el panel por el lado de las conexiones.

Se debe prestar especial atención a la presencia de sombras sobre los paneles fotovoltaicos provocadas por árboles, torres de media tensión, otros paneles, etc., las cuales pueden originar la aparición de áreas térmicas irregulares que den lugar a una falsa interpretación (especialmente si las termografías son tomadas demasiado pronto en la mañana o demasiado tarde por la tarde).

Igualmente se debe tener en cuenta la presencia de viento ya que éste, por convección, va a reducir la temperatura de los puntos calientes, los cuales podrían no considerarse como fallos reales.

4.4.2. Otros elementos a inspeccionar

Otras áreas que pueden ser supervisadas mediante un análisis termográfico son los motores de los seguidores. Debido a diferentes situaciones tales como las condiciones ambientales a las que se ven sometidos o si su dimensionamiento no ha sido el correcto, estos motores pueden presentar calentamientos que pueden acortar su vida de forma importante. Estos calentamientos pueden estar provocados por aspectos mecánicos (problemas en los cojinetes, alineamientos, etc.), problemas de ventilación, fugas en los devanados, etc.

Igualmente podremos utilizar la termografía para detectar problemas de calentamiento en inversores y transformadores de media tensión. En estos últimos se podrán detectar problemas en las conexiones de baja y media tensión, así como problemas internos en los devanados, etc.

Otro área donde la termografía puede ser de gran ayuda para el mantenimiento tanto preventivo como predictivo es la revisión de todos los puntos de conexión, los cuales con el tiempo pueden aflojarse dando lugar a problemas de funcionamiento y paradas innecesarias, sobre todo teniendo en cuenta que una planta fotovoltaica puede implicar un gran número de conexiones y cuadros eléctricos tanto en CC como CA. En este sentido hay que tener en cuenta que una mala conexión supone un punto de mayor resistencia, es decir un punto donde se va a producir una mayor disipación térmica por efecto Joule.

4.5. Identificación de defectos

Como se ha comentado, el uso de la termografía permite poner de manifiesto de forma rápida y sencilla los posibles defectos en módulos fotovoltaicos. A continuación se exponen algunos ejemplos.

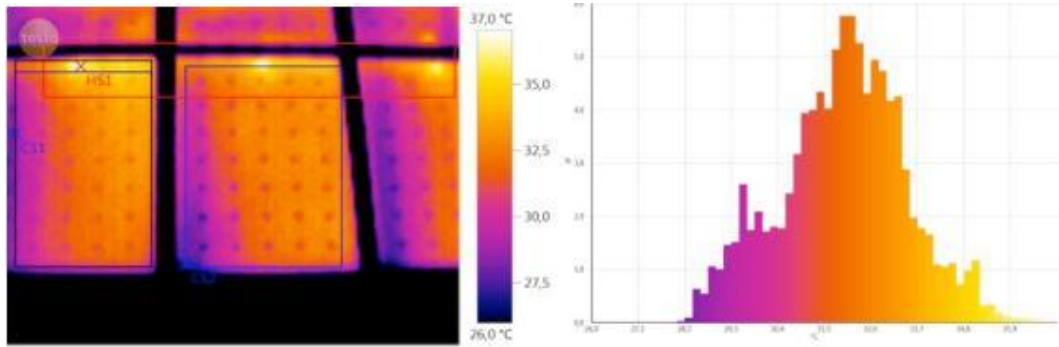


Figura 58. Punto caliente en la misma posición de módulos diferentes

En la Figura 58, la célula situada delante de la caja de conexión tiene siempre una temperatura mayor que el resto del módulo, posiblemente debido a efectos de aislamiento. En la Figura 59, se puede ver un punto caliente con una temperatura superior a 90 °C. La superficie del módulo estaba rota en la zona de la célula afectada.

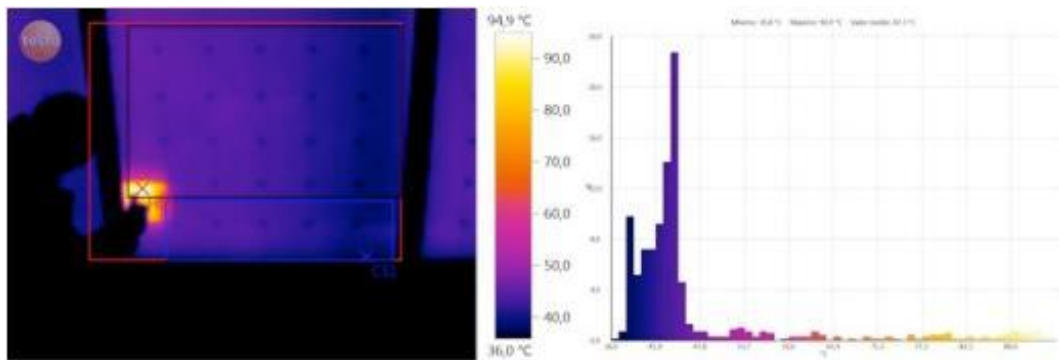


Figura 59. Célula sobrecalentada

En la Figura 60 se puede observar una fila de células completamente sobrecalentada. Esto puede ser debido a problemas de mismatching, un defecto de célula o de interconexión.

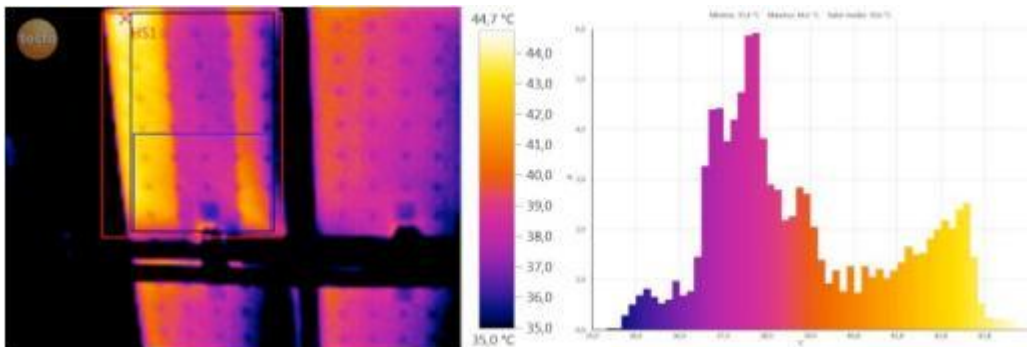


Figura 60. Serie sobrecalentada

4.6. Importancia de la termografía en la Energía Solar

Dado el plazo de amortización de las plantas fotovoltaicas, entre 6 y 10 años, es crítico asegurarse de que el rendimiento de la planta esté dentro de los límites considerados durante la etapa de diseño de la misma, de forma que se asegure su rentabilidad durante todo el periodo de explotación. En este sentido, la termografía es una herramienta indispensable para el análisis del funcionamiento y eficiencia de los diferentes elementos que componen la instalación: módulos fotovoltaicos, conexiones, motores, transformadores, inversores, etc. Una reducción de la eficiencia de los paneles fotovoltaicos puede suponer un incremento importante del período de amortización de la planta.

5. Termografía en Aplicaciones Aéreas

La termografía más habitual se realiza a nivel terrestre: fotovoltaica, mantenimiento predictivo, veterinaria, edificación, etc... Sin embargo, las inspecciones de esta termografía, realizada con cámaras de mano, en todas las áreas (excepto en las más pequeñas), requieren mucho tiempo y trabajo, y obtienen imágenes de pequeño campo de visión.

Debido a recientes avances en tecnología infrarroja, a la disponibilidad de sistemas de imágenes de alta sensibilidad térmica y de formato espacial grande (alta resolución), ha sido posible desarrollar técnicas de inspección termográfica con cámaras aerotransportadas, es decir, montadas en una plataforma aérea: aviones, globos, helicópteros, UAVs (Vehículo Aéreo No Tripulado)... Este tipo de inspección termográfica ofrece múltiples posibilidades, quedando obsoletas las inspecciones terrestres en determinadas aplicaciones.

5.1. Metodología

La metodología para capturar imágenes infrarrojas aéreas es muy similar a la toma de fotografías aéreas. La plataforma aérea vuela sobre un área determinada con una cámara montada en ella (ej. fuselaje de un avión) y orientada directamente hacia abajo sobre la superficie a inspeccionar. Las imágenes se guardan en un disco

duro para ser procesadas después. La diferencia entre la termografía infrarroja y la fotografía aérea visible es el momento del día en el que se realiza la inspección y la longitud de onda que obtiene el detector. La termografía infrarroja de objetos en tierra se realiza de noche, revelando fuentes de calor y las diferencias relativas de calor de un objeto a otro.

5.1.1. Trazamiento de Mapas Térmicos, Orto-rectificación y Procesamiento Posterior

Usando una cámara infrarroja de alta resolución, se puede hacer la inspección de un par de edificios o unos cuantos miles de pies de tuberías subterráneas, volando sobre la zona, tomando las imágenes y grabando la información. Esto funciona con áreas muy pequeñas, pero no es posible para hacer mapas térmicos precisos de grupos completos de edificios, universidades, ciudades o bases militares sin orto-rectificación de las imágenes.

Para producir mapas térmicos orto-rectificados, se debe reunir mucha más información, y añadirla a las imágenes infrarrojas. La orto-rectificación es un proceso que corrige las distorsiones producidas por los errores geométricos que pueden causar las variaciones topográficas de la superficie y la inclinación del sensor.

Durante la inspección, el avión vuela sobre líneas rectas en una cuadrícula pre-planificada. El operador de termografía infrarroja controla el sensor de captación de información siguiendo una lista de verificación estructurada para el manejo metódico de la información. Las imágenes se deben reunir con un sistema exacto, directo y digital, acoplado a un sistema GPS diferencial en tiempo real que provee posicionamiento x , y , z del sensor todo el tiempo.

Después de obtener la información se procesan las imágenes infrarrojas digitales y se convierten en una serie de imágenes orto-rectificadas en forma de cuadrados, los cuales se colocan juntos para crear una composición en forma de imagen de gran tamaño. Un sistema de ordenador organiza esta información usando un modelo de elevación digital (DEM en Inglés) del área, que consiste en una cuadrícula uniforme de valores de puntos de elevación de la posición y orientación de la cámara con respecto a un sistema de rendimiento tridimensional coordinado.

El resultado se presenta como una imagen térmica de alta resolución en forma de geo-TIFF (verFigura 61), el cual es compatible con un sistema de soporte geológico GIS tal como los siguientes programas de diseño de mapas: ESRI ArcView™, Map 3D, AutoCAD®, Global Mapper, MapInfo™, etc.

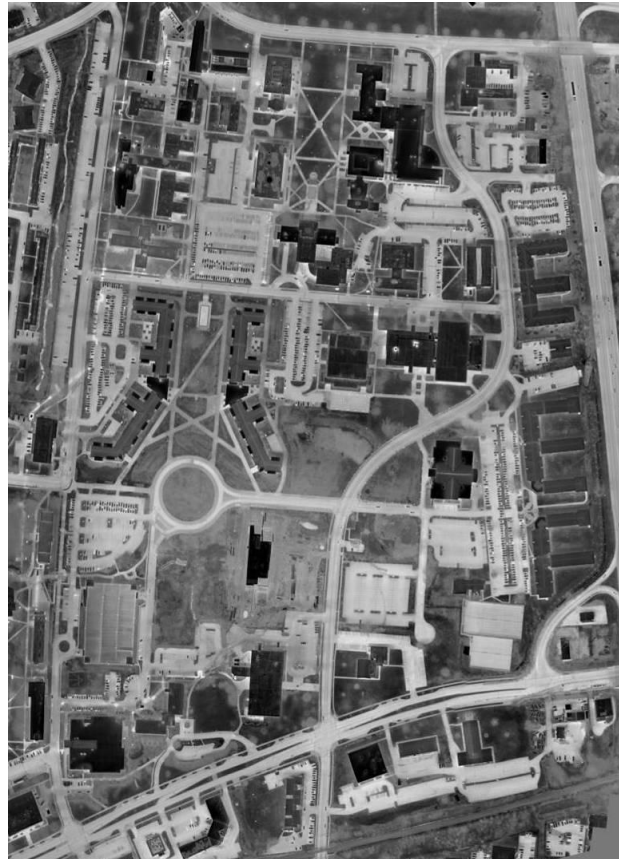


Figura 61. Mosaico de imagen infrarroja (geo-TIFF) de una universidad pequeña.

Una vez creados los mapas de alta calidad digital-térmica junto con las fotografías orto-rectificadas, estos pueden ser añadidos como nuevas capas de información a los CAD existentes ó nuevos, y al sistema GIS. La información digital también se puede procesar luego en otras formas, como a través de la creación de imágenes de colores falsos para resaltar las áreas de interés, añadiendo información de temperaturas ó creando informes gráficos.

5.2. Objetivos

Algunas ciudades disponen de sistemas de calefacción centrales, en las que se distribuye el agua caliente a través de tuberías bajo las calles. Con termografías aéreas controlan las pérdidas térmicas que pudieran producirse. También utilizan

los mapas termográficos para estimar la calidad térmica de los edificios y realizar una labor de concienciación a los ciudadanos sobre el ahorro energético.

Las inspecciones aéreas con cámaras infrarrojas podrían resumirse en las siguientes aplicaciones:

- Detección de daños y filtraciones en azoteas y techos
- Pérdidas en cañerías de vapor
- Detección de minas y bombas
- Seguimiento de animales
- Control de medio ambiente:
 - Control de combustiones en vertederos
 - Localización de vertidos contaminantes en ríos y costas
 - Control de incendios forestales
- Inspecciones de líneas eléctricas de alta tensión.
- Búsqueda y rescate
- Ayuda en vuelos

5.2.1. Pérdidas en cañerías de vapor

En el caso de los sistemas de calefacción de un distrito, el sistema de distribución puede sobrevolarse rápida y económicamente, produciendo una imagen panorámica térmica. De esta manera se obtiene la información necesaria para la planificación del manejo de las propiedades y su mantenimiento preventivo. Las áreas donde se sospeche que hay problemas pueden ser señaladas y documentadas. Como resultado de encontrar y reparar las fugas del sistema de vapor de agua, se puede reducir la cantidad de energía a usar con todos los beneficios que ello conlleva.

La termografía infrarroja puede ayudar a inspeccionar los generadores y tuberías de vapor dentro de los edificios, realizando el monitoreado desde la superficie. Sin embargo, los conductos de distribución y condensado se examinan mejor desde el aire.

La diferencia de temperatura entre las tuberías activas y la superficie es normalmente lo suficientemente grande, dependiendo de la profundidad de la tubería, los materiales que la cubran, la corriente y la temperatura.

Los sistemas de vapor de agua y los conductos del condensado son casi siempre fácilmente visibles con la termografía infrarroja, aún cuando no existan problemas resaltantes. Esto se debe al hecho de que no importa lo bueno que sea el material de aislamiento, siempre hay pérdida de calor en las tuberías, la cual llega hasta la superficie. Las áreas problemáticas generalmente son completamente evidentes ya que presentan impresiones infrarrojas más brillantes (ver Figura 62) que exceden la norma.

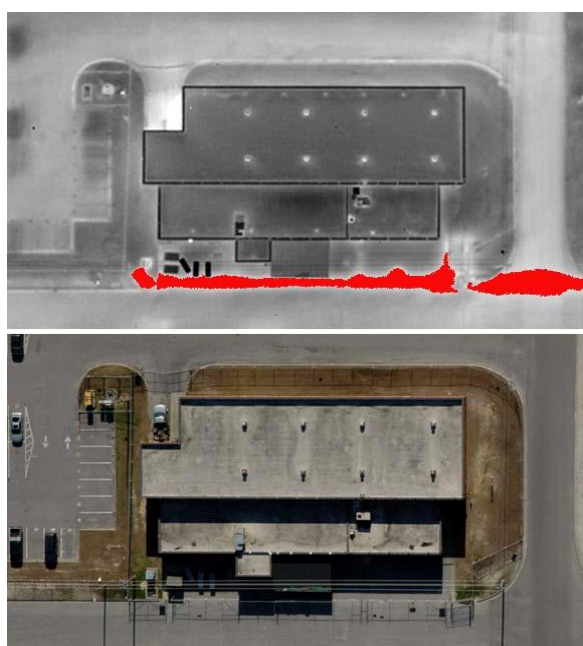


Figura 62. Imagen infrarroja e imagen visual de un sistema de vapor de agua con fuga coloreada en rojo.

5.2.2. Aviones

Instalada en aviones, una cámara térmica puede utilizarse para facilitar el aterrizaje. Puede ayudar a los pilotos mejorando su capacidad para ver la tierra y a otros aviones a grandes distancias, incluso en oscuridad total, con niebla ligera, polvo o humo.

Las cámaras térmicas nunca sustituirán a las herramientas e instrumentos existentes que un piloto utiliza para aterrizar el avión. No obstante, puede

constituir un buen complemento mostrando al piloto una imagen clara de la situación. Cuando el avión se desliza lentamente sobre la pista para despegar o aterrizar, la cámara térmica puede contribuir a evitar accidentes. Una cámara térmica puede ver a través de la niebla y la lluvia ligeras. Por tanto, puede detectar fácilmente a otros aviones u objetos que el ojo no puede detectar a simple vista en condiciones climáticas adversas.

5.2.3. Misiones de búsqueda y rescate

La tarea principal de los profesionales de búsqueda y rescate es encontrar a personas que están en apuros, pérdidas, enfermas o heridas, tanto en una zona remota o de difícil acceso, como montañas, desiertos o bosques, como en el mar, ya sea cerca o lejos de la costa. Las búsquedas pueden realizarse con personas que se desplazan a pie, a caballo o en vehículos.

Las cámaras térmicas a veces se montan en helicópteros que sobrevuelan la zona de búsqueda. Por lo general, también se utiliza asistencia aérea si está disponible.

Una cámara térmica detecta fácilmente actividad humana en zonas remotas, de forma que la víctima puede localizarse antes de que sea demasiado tarde. Una cámara térmica es capaz de hacer esto en oscuridad total, en tierra, mar o aire.

6. Termografía en Medicina

En la actualidad, la termografía infrarroja es una de las técnicas más eficientes para el estudio de las temperaturas corporales. Las cámaras infrarrojas son una relevante herramienta de diagnóstico para un sinnúmero de procedimientos clínicos y experimentales, que van desde chequeos de cáncer de mama hasta cirugías a corazón abierto. 30 años de uso clínico y más de 8,000 estudios respaldan a la termografía como una alternativa segura y efectiva de exploración del cuerpo humano.

Esta técnica de diagnóstico resulta ser precisa, cuantificable y no invasiva. Al ser no invasiva y no requerir radiación no es un procedimiento dañino para el cuerpo humano. La investigación médica ha comprobado que la termografía es una herramienta útil en la investigación y eficaz en el diagnóstico del cáncer de mama,

trastornos en el sistema nervioso, en el metabolismo, problemas de cuello y espalda, síndromes de dolor, artritis, trastornos vasculares y lesiones en tejidos blandos, entre otros.

Se han llevado a cabo muchos estudios termográficos que demuestran el patrón normal anticipado de temperatura en una imagen térmica en estado estacionario así como en movimiento, como por ejemplo durante el calentamiento y enfriamiento de la piel. Los cambios característicos en los patrones normales se asocian a diferentes fenómenos patológicos. Dichos cambios dan la pauta para llevar a cabo investigaciones no invasivas que resulten valiosas para el diagnóstico.

6.1. Objetivos

La aplicación de la termografía en la medicina (Figura 63) se fundamenta en la fisiología térmica humana y en las bases fisiopatológicas de termorregulación cutánea en enfermedades. Éste es un método único por su capacidad para mostrar procesos fisiológicos y metabólicos, como por ejemplo el sentimiento de dolor, más que detalles puramente anatómicos, al revelar el efecto combinado del sistema nervioso autónomo y el sistema vascular sobre la temperatura. Las cámaras termográficas incorporan la última tecnología, haciéndolas adecuadas para su uso en numerosas aplicaciones médicas:

- Detección temprana de cáncer de piel.
- Técnica complementaria para el diagnóstico de cáncer de mama.
- Estudio y localización exacta de puntos de dolor, medida de los mismos y ayuda en su diagnóstico.
- Monitorización evolutiva de la efectividad de anestesia local en extremidades, y consecuente reducción de tiempo y riesgo.
- Localización rápida de patologías en músculos y huesos, y en sistemas cardiovascular o neurológico.
- Análisis de la condición funcional de los tejidos blandos lesionados para elegir el tratamiento mejor y más apropiado.
- Estudio de la implicación de raíces nerviosas en patologías, incluyendo nervios raquídeos.

- Valoración de gravedad de quemaduras.
- Evolución de injertos y úlceras.
- Cirugía de corazón abierto.
- Pruebas “cold stress” (prueba de estimulación por frío).
- Documentación objetiva sobre el tratamiento más adecuado en diversas dolencias.
- Medicina deportiva.
- Veterinaria.

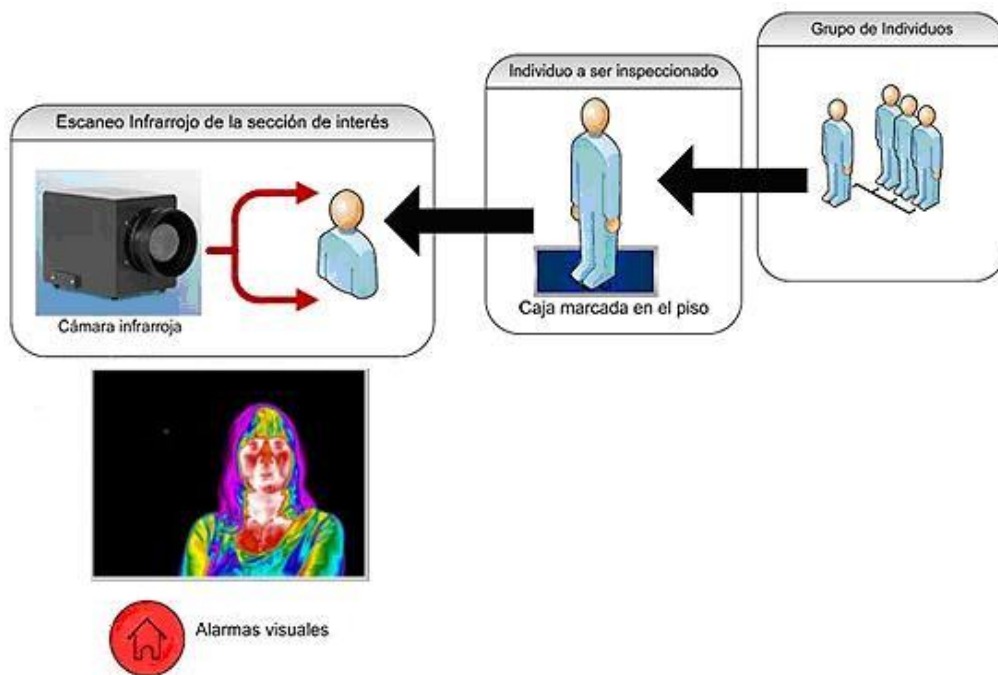


Figura 63

6.1.1. Cáncer de Mama

Sabemos que las células cancerosas requieren un mayor suministro de sangre, lo que genera calor dentro y alrededor de las células. La Imagen Termográfica Digital Infrarroja (ITDI) es un examen de 15 minutos no invasivo de la fisiología mamaria. Es un procedimiento valioso para alertar a su doctor de los cambios que se pueden detectar en la enfermedad mamaria en sus etapas tempranas.

El beneficio de ITDI es que ofrece una oportunidad más de detección temprana de las enfermedades mamarias antes de la autoexploración, exploración por su doctor y en algunos casos antes de la mastografía y el ultrasonido por sí solos.

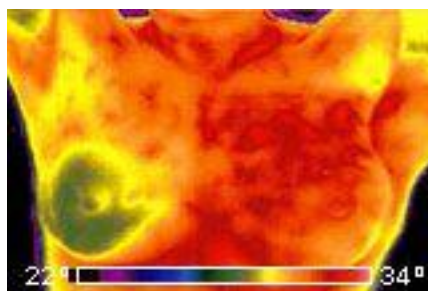


Figura 64. Examen termográfico

Un examen termográfico (Figura 64) muestra una diferencia anormal en la temperatura, lo que podría significar cáncer de mama en el pecho izquierdo.

La ITDI detecta los cambios mínimos fisiológicos que se acompañan en las enfermedades mamarias, ya sean: cáncer, cambios fibroquísticos, infecciosos o enfermedad vascular. El doctor puede entonces planear de acuerdo al resultado y programar un sistema de monitoreo individual antes, durante y después de cada tratamiento.

La detección temprana del cáncer de pecho es crucial para las mujeres que la tienen y esperan sobrevivir a él. Si el cáncer de pecho es detectado temprano, los médicos facultativos convienen que la enfermedad tiene hasta 95% de probabilidad de curarse.

6.1.2. Veterinaria

El cuerpo de un animal genera calor para sobrevivir. Dicho calor fluctúa a través del cuerpo según el torrente sanguíneo, y este se regula, a cierto grado, según sea necesario. Por ejemplo, los tejidos dañados necesitan mayor torrente sanguíneo para la creación de células sanas y así recuperarse. El reconocimiento natural del cuerpo de la lesión y el aumento subsecuente del torrente sanguíneo ocurren, incluso, antes de que el animal presente señal de dolor (cojera, por ejemplo).

La termografía infrarroja es un método rápido y no invasivo para detectar puntos calientes, ya que esta técnica genera una imagen de gradientes térmicos en tiempo

real. Ya que el calor es uno de los principales signos que presentan las infecciones y las lesiones, podemos usar la termografía para detectar estas zonas en las fases iniciales. También se pueden detectar fácilmente nervios irritados y músculos dañados. Dentro de las aplicaciones más comunes cabe destacar: patologías axiales, articulares, fracturas, tendinitis.

Los infrarrojos se usan comúnmente para el diagnóstico de caballos, pero son numerosos los zoólogos que no solo han aprendido con la termografía a diagnosticar sino a conocer el comportamiento de todo tipo de animales.

El calor infrarrojo que emite un animal puede «verse» con una cámara infrarroja. Los patrones de calor que se proyectan le ayudan al médico a detectar si el flujo sanguíneo del animal es normal o anormal. El flujo sanguíneo se incrementa o disminuye, y ambos casos son ejemplos de problemas de salud.

Un «punto caliente» en un cuerpo animal indica inflamación o incremento en la circulación. Los puntos calientes, por lo general, se ven directamente en la piel que cubre la lesión. Un «punto frío», por lo general, es una reducción de sangre debido a la hinchazón, trombosis o tejido cicatricial.

Si las piernas se han cubierto, o se han tenido ampollas o aplicado linimentos, se proyectarán como zonas con incremento de calor. La simetría termal es obligatoria: comparas un área anatómica con la misma área, pero del otro extremo. Por ejemplo: el exterior de una pata con el exterior de la otra pata.

6.1.3. Inflamación

La termografía se usa para determinar si existe inflamación en un área que al palparse produzca dolor, o detectar un área que aumente el torrente sanguíneo cuando no existe dolor específico o síntomas (información subclínica). La mayoría de los caballos no sólo presenta un solo problema asociado a la cojera. La termografía también ayuda a la detección de áreas secundarias con problemas.

Se ha observado que los tendones y las comisuras presentan cambios inflamatorios durante un período de dos semanas antes de que la cojera clínica sea evidente.

6.1.4. Lesiones musculares

Un uso muy importante dado a la termografía es la detección de lesiones musculares, ya que localiza el área inflamada en un músculo o músculos y detecta la lesión antes de que llegue a ser clínica. La lesión se proyecta como un área de disminución constante de circulación, en comparación a la parte contraria.

6.1.5. Lesiones nerviosas

Una lesión en un nervio, debido a un trauma directo o secundario u otra lesión o enfermedad, afecta el flujo de sangre, y ello puede verse gracias a la termografía.

6.1.6. Medicina preventiva

La termografía también podría utilizarse para determinar la vasculatura y el torrente sanguíneo de los tejidos antes y después del ejercicio.

Otros usos incluyen exámenes antes de la compra, revisión para saber si se adapta a la silla de montar, entrenamiento auxiliar para evitar lesiones, exámenes antes de las carreras, balance en las pezuñas, seguimiento del proceso de sanación de un tendón después de una lesión, etc. Como se comprueba, existen diversos usos para esta herramienta no invasiva y confiable de diagnóstico.

6.1.7. SARS

Una de las aplicaciones de la termografía infrarroja con más impacto en los medios, fue su utilización para detectar la fiebre alta en pasajeros de los aeropuertos.

El Síndrome Agudo Respiratorio Severo (SARS) conocido también como gripe aviar es una enfermedad infecciosa y mortal identificada oficialmente por primera vez en 2003. Entre otros síntomas, el SARS se caracteriza por una fiebre superior a 38°C. La facilidad que demostró el SARS para propagarse a través de las fronteras provocó que en algunas áreas de tránsito de pasajeros, especialmente aeropuertos, se montasen cámaras termográficas para identificar posibles afectados.

Una cámara termográfica no detecta el SARS, sin embargo, un vistazo a un termograma humano permite detectar anomalías en la temperatura corporal (como fiebre alta). El mismo valor alto de temperatura o calor corporal puede ser generado por una persona sana que ha venido realizando un esfuerzo físico, como caminar de manera apresurada o correr. En el caso de que una persona tuviese una

temperatura facial igual o mayor a la indicada según los síntomas de fiebre, no quiere decir al 100% de veracidad que presente gripe aviar, quizá solo sea una gripe estacional o una infección. Sin embargo, a pesar de no obtener un diagnóstico preciso, esta medida fue muy útil para la detección de posibles afectados por la enfermedad y poder así evitar el contacto directo con ellos.

7. Termografía en Industria

En el ámbito industrial la aplicación de la termografía en el área de mantenimiento es una de las más difundidas, especialmente en el mantenimiento llamado predictivo o también en el mantenimiento proactivo.

La termografía infrarroja en el área de mantenimiento presenta ventajas comparativas inigualables. Quizá sea el ensayo más divulgado y exitoso de los últimos años. Se complementa eficientemente como los otros ensayos del mantenimiento, así como son el análisis de lubricantes, el análisis de vibraciones, el ultrasonido pasivo y el análisis predictivo de motores eléctricos. También, por supuesto, con los ensayos no destructivos clásicos como lo son el ensayo radiográfico, el ultrasonido activo, tintas penetrantes, partículas magnéticas y corrientes inducidas. Sin embargo, de todas las tecnologías relacionadas al mantenimiento, la termografía infrarroja sería la que está más vinculada a la seguridad de una instalación. Cuando nos referimos a seguridad queremos decir seguridad tanto de las personas como edilicia.

La gran mayoría de los problemas y averías en el entorno industrial - ya sea de tipo mecánico, eléctrico y de fabricación se manifiesta generando calor. Este calor o elevación de temperatura puede ser una elevación súbita, pero por lo general, dependiendo del objeto, la temperatura comienza a manifestarse lentamente. Ahí es donde la termografía se transforma en una herramienta irremplazable. La implementación de programas de inspecciones termográficas en instalaciones, maquinaria, cuadros eléctricos, etc. hace posible minimizar el riesgo de una falla de equipos y sus consecuencias (parada de planta y/o siniestro), a la vez que también ofrece una herramienta para el control de calidad de las reparaciones efectuadas.

En la Figura 65 se puede observar un ejemplo de un motor con un calentamiento excesivo debido a un fallo de aislamiento.

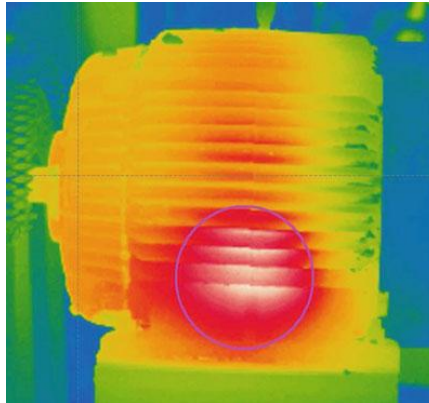


Figura 65. Motor con un calentamiento excesivo

Esto significa reducir costes por lucro cesante, reducir las pólizas de seguro de la planta en sí y los seguros del personal en el área de accidentes del trabajo. Los otros gastos que se reducen sensiblemente son los del sector de mantenimiento propiamente dicho. Área que puede organizar mejor sus tareas pensando a futuro y tratando de disminuir al mínimo posible las reparaciones diarias, las cuales son siempre muy costosas. También reduce los costes por disminución de stock de repuestos y por mejor control de los proveedores a los cuales pueden reclamar en caso que la disipación de calor no esté conforme a las normas o a sus expectativas.

La calidad de la ingeniería y el montaje inicial son fundamentales para los resultados futuros. La implementación de la termografía en el área de mantenimiento tiene un beneficio también indirecto sobre el área de producción y la calidad: menos paradas no programadas, lo cual significa mayor productividad y también uniformidad en el producto.

7.1. Termografía en instalaciones mecánicas

La Termografía Infrarroja tiene varias aplicaciones importantes que han surgido del monitoreo de la temperatura y del análisis de problemas durante la operación de un sistema mecánico.

En algunas instalaciones mecánicas tales como sistemas de aislamiento térmico y/o revestimiento refractario, lo más importante es identificar y cuantificar la extensión de una falla en el revestimiento; desde este punto de vista, se puede

prever la condición de los equipos tales como calderas, hornos o calentadores de proceso, vasijas en unidades de ruptura catalítica, reactores y líneas de proceso, mientras se monitoriza periódicamente por termografía infrarroja.

En otras instalaciones mecánicas tales como los sistemas de intercambio de calor, es más importante evaluar que circunstancias o elementos pueden llegar a causar una pérdida de eficiencia en la función básica del sistema; la termografía infrarroja puede suministrar el patrón térmico exterior de un intercambiador de calor, que facilita el análisis de un problema de este tipo.

En los equipos rotativos tales como motores eléctricos, turbinas, reductores de velocidad, bombas centrifugas o reciprocantes, compresores centrífugos o reciprocantes, ventiladores, etc., la termografía infrarroja puede ayudar a identificar el sitio de una falla cuando el exceso de calor de la misma se exterioriza. El exceso de calor se puede originar por varias circunstancias, por ejemplo:

- Por la fricción que ocurre en el interior de un rodamiento o cojinete cuando este se encuentra defectuoso, cuando presenta desgaste natural.
- Al soportar una carga con desalineamiento, cuando se encuentra con lubricación inadecuada, o cuando es maltratado.
- Por fricción sobre las pistas de una polea cuando existe tensionamiento inadecuado o desigual en las correas, cuando existe desalineamiento en este tipo de acoplamientos, o existen diferencias importantes entre la potencia suministrada y la requerida entre el motor y el equipo conducido.
- En el interior de un acople mecánico directo entre el equipo motor y el equipo conducido, cuando existe desalineamiento.
- En el interior de las válvulas de admisión y descarga de un equipo reciprocante, cuando existe recirculación del flujo a través de las mismas.

Se puede evaluar la condición de los sistemas de transporte de fluidos, que se encuentran compuestos en su mayoría por elementos como tuberías, válvulas de bloqueo, válvulas de regulación de flujo, válvulas tipo cheque, válvulas de seguridad y en algunos sistemas por trampas de vapor.

Una inspección infrarroja ayuda a identificar los sitios de discontinuidades o distribuciones anormales de temperaturas que indiquen fallas como taponamientos en el fluido trasegado, compuertas en mal estado, áreas de sello deficientes en los diferentes tipos de válvulas, y en general, permite establecer el estado mecánico de cada uno de los elementos, mientras exista un gradiente de temperatura en el fluido que de un contraste térmico adecuado con los alrededores y además el aislamiento exterior en caso de haberlo, lo permita.

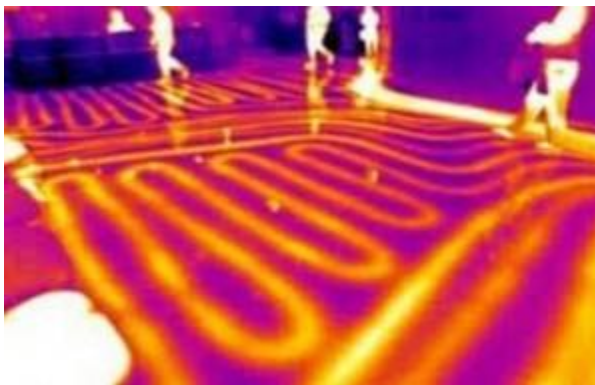


Figura 66. Termografía de suelo radiante

En tanques y ductos aislados, donde se almacenan o transportan productos que deban mantenerse a temperaturas diferentes a la ambiental, la termografía infrarroja permite la localización de puntos de intercambio de calor y constatar las condiciones generales del aislamiento térmico, lo que se refleja directamente en la eficiencia del proceso. Para determinar los niveles en tanques de almacenamiento o transferencia, es suficiente la observación de la diferencia de temperaturas establecida arriba y abajo del nivel del líquido. El nivel será fácilmente visible si el tanque estuviese calentado por el sol o si el producto almacenado tiene una temperatura diferente a la del medio ambiente.

En general, del tipo de instalación mecánica depende el uso o la aplicación más práctica que se le dé a la Termografía Infrarroja; cada clase de instalación tiene sus propios tipos de fallas más comunes, y en la búsqueda de su solución, se crean los procedimientos de inspección termográfica y los criterios de análisis.

7.2. Termografía en sistemas de distribución eléctrica

Uno de los aspectos que caracteriza el desarrollo de una sociedad es su consumo de energía en todas sus formas y en particular su consumo de energía eléctrica. En

este sentido observamos cómo la utilización de la electricidad en los países desarrollados se ha incrementado de forma importante en los últimos tiempos. Esta dependencia de la energía eléctrica se traduce en una demanda de un suministro eléctrico de mayor calidad y disponibilidad. Una pieza clave para lograr estos objetivos es el mantenimiento predictivo-preventivo de las líneas y sistemas de distribución eléctrica, lo cual exige la utilización de procedimientos y equipos de mantenimiento en consonancia con las necesidades actuales. En este sentido, la termografía surge como una tecnología cuya aplicación a la inspección de los sistemas de distribución eléctrica va a ayudar a detectar de forma anticipada posibles averías en los mismos, disminuyendo de esta forma la probabilidad de fallo de la instalación en el futuro.

7.2.1. Fallos en sistemas de distribución eléctrica

La principal causa de fallo en los sistemas eléctricos es un exceso de temperatura provocado por diferentes motivos:

- Incremento de resistencia en puntos de conexión. Es decir, un incremento de la resistencia de contacto da lugar a un incremento de la potencia disipada en dicho contacto, lo cual se traduce, en condiciones normales, en un incremento de su temperatura dando lugar a un “punto caliente”. Este incremento de la resistencia de contacto puede deberse a un fenómeno de oxidación o corrosión, tornillos que se aflojan o una presión insuficiente en los contactos móviles.
- Fallos en los sistemas de refrigeración. El calor que se genera, por ejemplo en los transformadores de potencia, debe ser evacuado al exterior a través de los sistemas de refrigeración en los intercambiadores de calor. Si esta extracción de calor se reduce o falla, debido por ejemplo a una obstrucción en los tubos del intercambiador o un fallo en los ventiladores en caso de tratarse de una ventilación forzada, el transformador se va a calentar en exceso lo cual puede dar lugar en última instancia al fallo del mismo.
- Corrientes de fuga en sistemas aisladores. La reducción de la resistencia de aislamiento debido a suciedad o contaminantes puede dar lugar a la

aparición de corrientes de fuga y arcos que dan lugar al calentamiento de los equipos y por lo tanto a su deterioro.

7.2.2. Tipos de inspecciones

Mediante una cámara termográfica se va a poder examinar cada uno de los elementos que componen el sistema de distribución eléctrica en busca de patrones de calentamiento, lo cual va a permitir detectar y resolver un posible problema antes de que dé lugar a un fallo o interrupción en la línea.

En este sentido podremos hablar de dos tipos de inspecciones bien diferenciadas: por un lado las inspecciones cualitativas y por otro las inspecciones cuantitativas.

En el primer caso no se busca en primera instancia el medir con gran precisión la temperatura de los elementos, sino realizar una comparación de los patrones de temperatura de los elementos que estén trabajando en las mismas condiciones. Afortunadamente, la distribución eléctrica se basa en sistemas trifásicos, de forma que este método es perfectamente válido para la inspección de sistemas de distribución ya que se va a poder comparar los elementos de una fase con los de las otras fases, lo cual nos proporciona una herramienta de inspección muy potente, rápida y fácil de utilizar llamada inspección cualitativa (Figura 67).

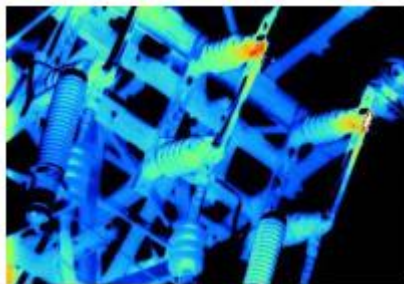


Figura 67. Inspección cualitativa.

Una vez detectada una diferencia apreciable de temperatura en un elemento, se puede pasar a la inspección cuantitativa midiendo de forma precisa la temperatura de los elementos.

Los procedimientos de operación deberán tener en cuenta la diferencia de temperatura entre el punto caliente detectado y la temperatura de elementos equivalentes o bien con la temperatura ambiente para determinar el nivel de actuación basado en una clasificación que determine la importancia y/o urgencia

del problema detectado teniendo en cuenta aspectos tales como el nivel de carga, condiciones ambientales, etc. En este sentido se pueden encontrar referencias como las que proporciona la NETA (International Electrical Testing Association), de esta forma diferencias de temperatura entre elementos similares en las mismas condiciones de trabajo (carga, etc.) superiores a 15 °C podrían implicar la toma de acciones inmediatas para la reparación de dicho equipo. Igualmente se recomienda el mismo tipo de acción cuando a diferencia de temperatura entre el elemento bajo estudio y la temperatura ambiente sea superior a los 40°C.

7.2.3. Sistemas de distribución eléctrica

Teniendo en cuenta los aspectos mostrados en el apartado anterior, para facilitar el análisis desde un punto de vista termográfico de los sistemas de distribución eléctrica, se van a agrupar dichos sistemas en tres áreas principales, las cuales presentarán unas características particulares. De esta forma se va a hablar de inspecciones en líneas de distribución, inspecciones en subestaciones y finalmente inspecciones en centros de transformación.

Líneas de distribución eléctrica

Son las encargadas de unir las centrales eléctricas con los puntos de consumo a través de las subestaciones y centros de transformación, proporcionando en la medida de lo posible la redundancia requerida gracias a su estructura de malla.

En función de la tensión de trabajo podremos hablar de líneas de media y alta tensión, cada una con sus características particulares tanto a nivel técnico (tensión nominal, altura de las torres, tipo de aisladores, número de líneas, etc.) como de gestión (criticidad, redundancia, disponibilidad, etc.), características que habrá que tener en cuenta a la hora de realizar la inspección termográfica de las mismas.

Uno de los aspectos que hay que tener en cuenta a la hora de considerar la inspección termográfica de las líneas de distribución será su accesibilidad. En este sentido podemos considerar tres formas básicas de inspección:

- **Inspecciones aéreas.** Este método se utiliza principalmente cuando es necesario inspeccionar grandes distancias en líneas de transmisión. El medio de transporte habitual es el helicóptero en el cual se instalan cámaras termográficas con sistemas giroscópicos. Este método presenta

unas ventajas claras en cuanto a velocidad y accesibilidad, sin embargo dado el alto coste que implica este tipo de inspecciones, su uso debe ser rentabilizado en la inspección rápida de amplias redes de distribución o en aquellos lugares donde la accesibilidad por tierra presente dificultades. De esta forma las compañías eléctricas suelen realizar inspecciones rutinarias cada 3 años para líneas de más de 45 kV. Dado el alto coste de esta técnica su uso en mantenimiento reactivo es mínimo, recomendándose para esta situación el uso de equipos portátiles.

- **Inspecciones en todo-terreno.** Este método es adecuado cuando sea posible seguir el tendido eléctrico por medio de un vehículo todo-terreno sobre el cual se puede instalar de forma adecuada una cámara termográfica con la cual obtener las termografías rutinarias.
- **Inspecciones a pie.** Así como la termografía aérea nos permite la revisión de largas distancias de una forma rápida, la inspección a pie nos va a permitir no solo la revisión preventiva de la instalación en aquellas zonas más accesibles sino también la revisión de los sistemas de forma puntual en aquellos casos en los que se realizan labores de mantenimiento y reparación. Igualmente, presenta la ventaja del gran contraste de las imágenes termográficas ya que al estar tomadas normalmente con el cielo como fondo, el cual presenta una temperatura muy baja, ofrece un contraste muy elevado con los elementos eléctricos a inspeccionar (Figura 68). Esta situación, por el contrario puede no darse en las inspecciones aéreas donde el fondo puede ser vegetación, pastos, asfalto, terreno, etc., los cuales al estar a temperatura ambiente proporcionan un menor contraste con los sistemas eléctricos.

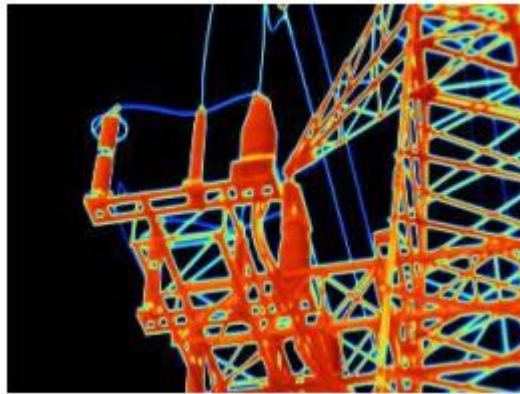


Figura 68. Termografía obtenida desde el suelo

Elementos a inspeccionar

Los elementos a examinar son típicamente los puntos de unión y distribución de las líneas. De esta forma se revisarán:

- grapas de amarre
- elementos de suspensión en estructuras de aislamiento
- pasos aéreos a subterráneo
- botellas de paso a tierra
- seccionadores tripolares
- cortacircuitos
- Igualmente y dependiendo de las circunstancias es posible detectar fallos en aisladores los cuales
- pueden presentar un calentamiento anormal debido a suciedad, deposiciones salinas, etc.

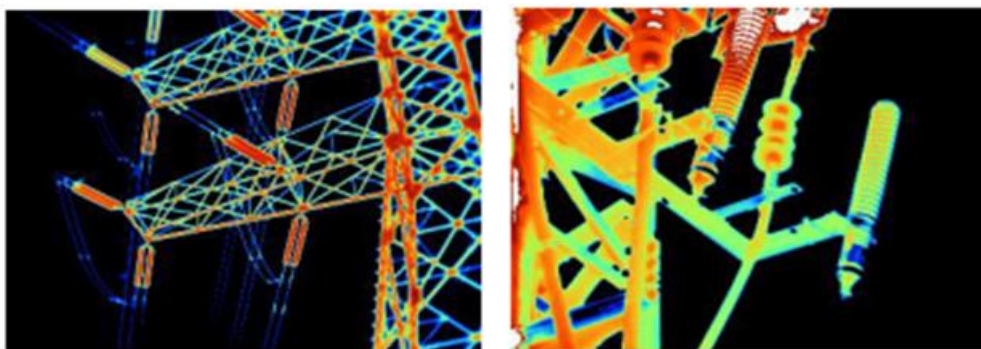


Figura 69. Elementos de suspensión en una torre de alta tensión (izq.) Elementos en una torre de paso aéreo a tierra (dcha.)

Aspectos a tener en cuenta

Condiciones ambientales y atmosféricas como por ejemplo:

- La velocidad del viento, lluvias recientes, humedad, niebla etc., aspectos que pueden enmascarar un punto caliente al reducir la temperatura del mismo por efecto de la convección, evaporación etc.
- Igualmente habrá que tener en cuenta cualquier fenómeno de reflexión del sol, por lo que en este sentido se recomienda el uso de cámaras termográficas de longitud de onda larga (8 a 14 micras), frente a las cámaras de longitud corta (3 a 5 micras) que se ven, a priori, más afectadas por el sol y sus reflejos. En este sentido una forma de proceder para determinar si se trata de un reflejo o de un verdadero punto caliente será la toma de diferentes termografías con diferentes ángulos de incidencia, si el punto caliente desaparece al movernos entonces se trata de un reflejo.
- La época del año. Ya que en función de la misma la temperatura ambiental será diferente, pudiendo influir en la temperatura de los puntos calientes
- La hora del día.

Aspectos ligados a la propia instalación.

- Habrá que tener en cuenta el nivel de carga de la línea, recomendándose no realizar inspecciones con niveles de carga inferiores al 30%. En este sentido, la época del año también puede ser importante a la hora de elegir el momento adecuado para estacionalizar las rutinas de termografía; hay que tener en cuenta que en tiempos recientes y en determinadas zonas, el pico de consumo se ha trasladado del invierno al verano debido al uso de sistemas de climatización.
- La altura de las torres. Dada la diferente altura de las torres de distribución eléctrica, dos aspectos a tener en cuenta a la hora de utilizar una cámara termográfica serán la resolución espacial y su resolución óptica. La resolución espacial nos determina el objeto más pequeño que es capaz de ver la cámara y la resolución óptica nos determina el objeto más pequeño sobre el cual se puede obtener una medida precisa de la temperatura. Ambos aspectos están determinados por el tipo de sensor y por la óptica de

la cámara y habrá que tenerlos en cuenta a la hora de considerar la distancia desde la que vamos a realizar las termografías.

Subestaciones

Las subestaciones eléctricas son los sistemas encargados de realizar la transformación y adecuación de las tensiones entre las diferentes redes de distribución eléctrica que llegan a las mismas, a la vez que proporcionan los elementos de mando, protección y corte para la gestión de dichas líneas. Teniendo en cuenta lo anteriormente dicho, las subestaciones son instalaciones con una mayor riqueza de equipos y sistemas en comparación con las líneas de distribución, y con unas características particulares que las diferencian a la hora de realizar inspecciones termográficas.

Elementos a inspeccionar

Los aspectos a examinar son los ya comentados: principalmente puntos de mal contacto tanto entre elementos fijos como entre elementos móviles, y en menor medida fallos de aislamiento. Sin embargo dado la gran riqueza de equipos podemos hablar también de fallos en baterías de condensadores, motores, sistemas de refrigeración, etc. Examinemos los principales puntos de fallo:

- **Puntos de mal contacto** (ver Figura 70). Las líneas de alta y media tensión que llegan hasta las subestaciones dan lugar a diferentes puntos de conexión y contacto. En este sentido se deben revisar, entre otros, los puntos de acometida, los contactos móviles de seccionadores, los cuales dada su naturaleza pueden tender a disminuir la presión de contacto incrementándose de esta forma su resistencia, lo que da lugar a puntos calientes fácilmente detectables con las cámaras termográficas. Igualmente se deben revisar las conexiones en interruptores, transformadores de medida, tanto de tensión como de corriente, y válvulas de descarga. A continuación revisaremos las conexiones de alta y baja en los transformadores de potencia donde nuevamente podremos encontrar contactos defectuosos.

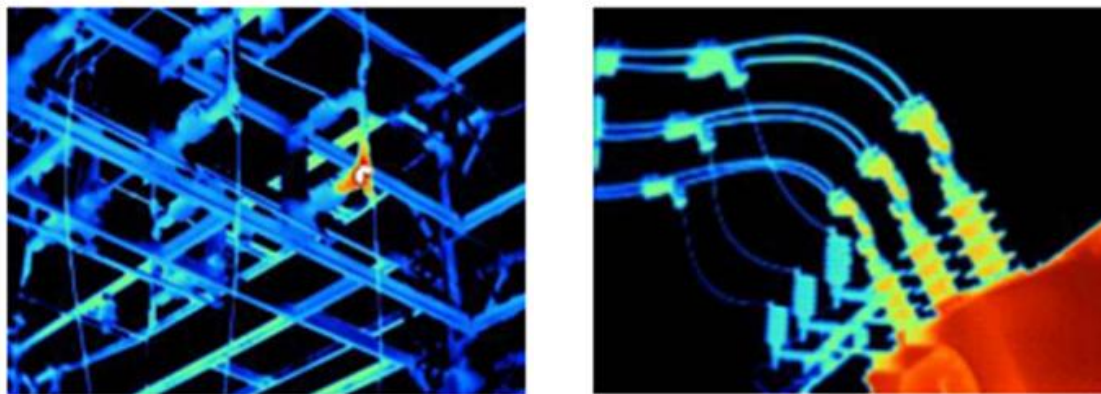


Figura 70. Punto caliente de un seccionador (izq.). Conexiones de un transformador

- **Sistemas de refrigeración.** En el caso de los transformadores de potencia podemos aprovechar su inspección para revisar la temperatura de su cuerpo y sus sistemas de refrigeración, tanto si se trata de ventilación natural como forzada. En este segundo caso, y en menor importancia dada la redundancia de elementos, podemos revisar posibles sobrecalentamientos o defectos en los motores de ventiladores o el correcto patrón de temperatura de los intercambiadores de calor y el estado abierto o cerrado de sus válvulas de apertura.
- **Sistemas de aislamiento.** Al igual que ocurría con las líneas de distribución, los aisladores sucios o con depósitos pueden dar lugar a la aparición de corrientes de fuga que aumentan la temperatura del equipo. Este es un problema que suele aparecer en instalaciones que muestran contaminación en los aisladores, la cual, junto a un aumento de la humedad pueden dar lugar a la aparición de descargas en los anillos del aislador. En dichos casos se recomienda la limpieza de estos elementos o la aplicación de siliconas especiales. Se deben revisar también los cuerpos de los descargadores.
- **Fallos en sistemas accesorios** tales como baterías de condensadores de compensación de reactiva, sistemas de control en continua, cuadros auxiliares, etc.

Aspectos a tener en cuenta

Nuevamente habrá que tener en cuenta las condiciones ambientales mencionadas en el caso de las líneas de distribución, al igual que aspectos relacionados con la

distancia de la cámara a los equipos; aunque en este caso dada la estructura de las subestaciones, en general dichas distancias suelen ser mucho menores, lo cual va a influir en la termografía obtenida, como hemos comentado anteriormente, a través de la resolución espacial y óptica.

Centros de transformación

Los Centros de Transformación son las instalaciones encargadas de transformar la media tensión en baja tensión para su utilización por parte de los usuarios finales, normalmente a tensiones de 400 V trifásica y 230 monofásica.

De forma general, un centro de transformación constará de un embarrado o anillo de media tensión (por ejemplo de 15 o 20 kV) al cual se pueden conectar a través de sus seccionadores oportunos una o más líneas. De este embarrado se alimentará el transformador o transformadores que proporcionan la baja tensión a los usuarios. Estos transformadores se podrán aislar de la instalación gracias a los seccionadores e interruptores de protección instalados en la acometida del primario. Sus potencias pueden variar dependiendo de la instalación, pudiéndonos encontrar potencias de 250 KVA, 400 KVA, 630 KVA, 1000 KVA, etc. Finalmente la salida de los transformadores se distribuye a través de diferentes salidas protegidas por fusibles en los CGP o BTV.

Elementos a inspeccionar

Considerando la descripción anterior, durante una inspección termográfica en un centro de transformación (Figura 71) se deberán inspeccionar todos los puntos de unión de la instalación, por ejemplo, los contactos de aisladores pasamuros, seccionadores, fusibles limitadores e interruptores, prestando especial atención a puntos calientes provocados por una presión inadecuada en los contactos móviles. Igualmente se deberán revisar las conexiones del transformador, tanto las bornas enchufables en alta como las bornas de baja. Un calentamiento excesivo de una de las bornas será una indicación de que el contacto no es correcto, por lo que deberemos revisar dichas conexiones enchufables o el apriete tuerca contra tuerca. Adicionalmente a los puntos de unión, es recomendable inspeccionar el cuerpo de los transformadores para detectar cualquier anomalía interna. Evidentemente las cámaras termográficas no pueden ver el interior del transformador, pero lo que sí

podemos ver es el efecto del calentamiento interno en la superficie del mismo, pudiendo detectar asimetrías en los patrones de calor que desvelen un problema interno.

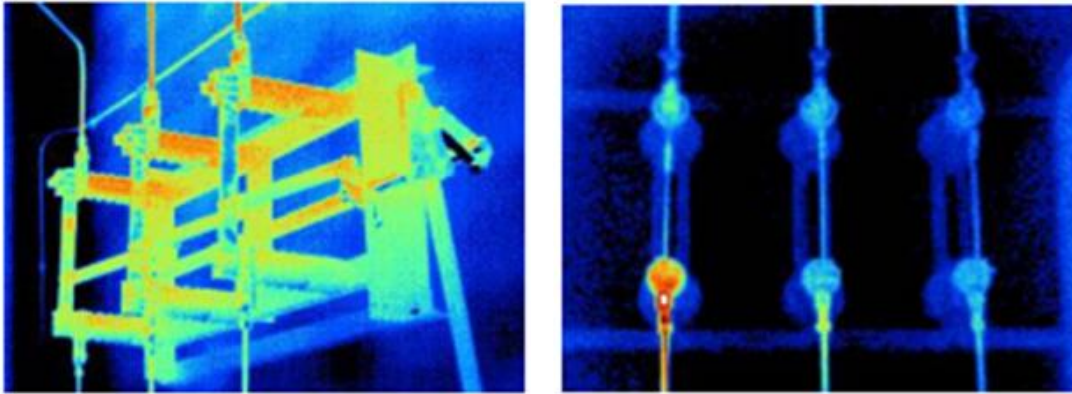


Figura 71. Seccionadores en un centro de transformación

Lo mismo que sucedía con las inspecciones en líneas y subestaciones, el método de trabajo pasa por una primera inspección cualitativa donde se comparan los diferentes elementos del sistema trifásico, buscando diferencias entre los elementos de cada fase para, una vez detectado algún elemento sospechoso, pasar al análisis cuantitativo que nos permita medir con precisión la temperatura de los puntos calientes detectados.

Aspectos a tener en cuenta

Evidentemente, para un centro de transformación en edificio las condiciones ambientales son un factor secundario, sin embargo en el caso de los CTI o Centro de Transformación de Intemperie, sí que habrá que tener en cuenta dichas circunstancias tal como comentamos para el caso de inspecciones en líneas y subestaciones. En el caso de los centros de transformación en edificio habrá que tener en cuenta la posible influencia de la temperatura de fondo ambiental o de algún foco de calor particular, tales como potentes luminarias, las cuales podrían dar lugar a reflejos indeseados. Dadas las dimensiones limitadas de los centros de transformación, donde todos los elementos suelen estar a una distancia respecto de la cámara normalmente no superior a los 2 metros, deberemos tener en cuenta también la resolución espacial de la cámara.

7.3. Otras áreas de aplicación en el mantenimiento industrial

Además de los ejemplos comentados en los apartados anteriores existen innumerables áreas de aplicación de la termografía en el mantenimiento industrial:

- Instalaciones eléctricas en general. Líneas de baja, media y alta tensión
- Endentado de cables
- Conexiones, fusibles, cuadros, cables y empalmes eléctricos.
- Conductos de barras
- Transformadores de potencia, de corriente y de tensión.
- Seccionadores
- Interruptores
- Excitatrices de generadores y motores - Escobillas
- Instalaciones Mecánicas – Reductores
- Análisis de escape en motores de combustión interna
- Pérdidas en condensadores
- Aislaciones y refractarios
- Hornos, calderas e intercambiadores de calor.
- Instalaciones frigoríficas, pérdidas de frío, torres de enfriamiento y climatización
- Máquinas rotativas
- Líneas de vapor
- Reactores
- Rodamientos
- Motores eléctricos.
- Hornos de Cemento
- Bombas de agua

- Pérdidas en válvulas líquidos-vapor, trampas de vapor.
- Verificación de niveles de líquidos en recipientes
- Líneas de producción, corte, prensado, forja, tratamientos térmicos.

7.4. Ventajas del mantenimiento preventivo con termografía

Las inspecciones mediante termografía para el mantenimiento preventivo industrial ofrecen una gran variedad de ventajas:

- Método de análisis sin detención de procesos productivos, ahorra gastos.
- Baja peligrosidad para el operario por evitar la necesidad de contacto con el equipo.
- Determinación exacta de puntos deficientes en una línea de proceso.
- Reduce el tiempo de reparación por la localización precisa de la Falla.
- Alargan la vida de los equipos.
- Facilita informes muy precisos al personal de mantenimiento.
- Ayuda al seguimiento de las reparaciones previas.

8. Otras Aplicaciones

8.1. Termografía en automóviles

Existen automóviles (como lo de la marca BMW) que están equipados con un sistema de visión nocturna basado en una cámara infrarroja y una pantalla situada en la parte superior de la consola (Figura 72).

Esto permite a los conductores ver y reconocer la posición de viandantes, vehículos, animales y objetos que estén en la carretera o en sus inmediaciones, ayudando a reconocer peligros potenciales en la oscuridad total, a través del humo, la lluvia o la nieve.



Figura 72. Sistema de visión nocturna de un coche

Gracias a su capacidad de detección de largo alcance (hasta 300 metros para un ser humano y más de 800 metros para objetos de 2,3 x 2,3 metros), el sistema de visión nocturna de BMW implica una ganancia de tiempo de unos 5 segundos a una velocidad de 100 km/h en comparación con las luces de carretera. Esto significa que los conductores disponen de más tiempo para reaccionar y evitar accidentes.

Un zoom digital puede enfocar objetos lejanos si se conduce a altas velocidades. La pantalla ajusta la imagen de la cámara automáticamente cuando el vehículo está llegando a una curva, permitiendo al conductor detectar obstáculos dentro y más allá de esta. Un cruce de peatones en el camino, por ejemplo, puede verse con seguridad. Entrar en lugares o garajes oscuros, o el conducir en los caminos difíciles por la noche, es más fácil y más seguro con este sistema de visión nocturna (Figura 73).



Figura 73. Imagen de un sistema de visión nocturna de un coche

8.2. Termografía en la agricultura y geología

La reflexión y emisión de radiación de los suelos está influenciada por el contenido de minerales, químicos, humedad, estructura, tamaño de las partículas y contenido orgánico del mismo.

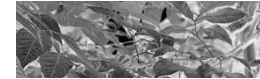


Figura 75. Imagen infrarroja de una planta

Minerales y plantas emiten energía en rangos diferentes en el infrarrojo térmico (MWIR -LWIR) y, también, reflejan de diferente forma en el NIR (cercano infrarrojo) (ver Figura 75).

Existen innumerables aplicaciones de la termografía en el ámbito de la agricultura y la geología. Por ejemplo la inspección de un viñedo mediante un UAV VTOL como el de la Figura 74. Este dispositivo consiste en un pequeño helicóptero teledirigido que lleva a bordo una cámara digital de video y una cámara infrarroja de 70 gramos de peso, que realiza inspecciones desde 50 y 30 metros de altura. El resultado de la inspección aérea revela zonas del viñedo con posibles fugas de irrigación, así como zonas con vegetación muerta, carencia de agua y zonas con salud pobre.



Figura 74. UAV VTOL

Además se pueden encontrar:

- Absorción de la clorofila (que ayuda a la identificación de las distintas especies de plantas)
- Análisis de la distribución de la irrigación del agua
- Análisis de stress de la vegetación
- Cartografía de las costas
- Cartografía de zonas geológicas

- Cartografía: límites tierra-agua
- Contabilidad de animales
- Determinación de estructuras de suelos regionales
- Determinación de la humedad de la vegetación & suelo
- Determinación de las condiciones de la tierra & asociaciones
- Diferencia entre nieve y nubes (satélite)
- Diferenciar tierras y rocas sin consolidar- consolidadas
- Discriminación de distintos tipos de madera.
- Discriminación de la vegetación y avalúo del vigor
- Discriminación de minerales y tipos de piedra
- Discriminación entre suelo y vegetación
- Discriminación entre vegetación y cosecha
- Erupciones volcánicas
- Evaluación de impacto de una sequía
- Evaluación del reflejo pico del verde (vegetación)
- Evolución de la cosecha y productividad
- Identificación de las distintas especies de plantas
- Identificación del tipo de bosque y forestación
- Localización y seguimiento de fuentes geotérmicas
- Mapeo de unidades geológicas mayores
- Mapeo térmico de depósitos recientes de material volcánico



Figura 76. Termograma de una erupción volcánica

Muchas de las aplicaciones en esta disciplina están ligadas a medidas remotas por satélite aunque mediciones con vuelos a baja altura y mediciones a nivel de terreno son también utilizados.

8.3. Termografía en el arte y la restauración

Son conocidos los problemas que la acción de los agentes atmosféricos causan a nuestro patrimonio monumental. El aumento de la contaminación atmosférica contribuye a aumentar las causas naturales del deterioro de las piedras que constituyen nuestro legado histórico. Lamentablemente, el conocimiento científico parcial de las causas que producen el denominado "mal de piedra", ha conllevado a restauraciones inapropiadas que, en no pocas ocasiones, lejos de solucionar el problema, han incrementado el proceso de deterioro o degradación.

La necesidad de encontrar métodos de diagnóstico rápidos y eficientes, especialmente los denominados como técnicas de análisis no destructivos, ha dado lugar a la aplicación de la Termografía Infrarroja (TIR) y la Espectrorradiometría (ER) como herramientas de apoyo al estudio del deterioro de las piedras monumentales.

El "mal de piedra" es la alteración de las características primitivas de la roca, debida a su adaptación a las nuevas condiciones ambientales en que se encuentra. Alteración que, en ambientes urbanos, es agravada por los altos índices de contaminación atmosférica. En algunos casos se han alcanzado tales grados de deterioro que han exigido programas específicos y urgentes de actuación, para poner a salvo la integridad del monumento (como es el caso de la Catedral de Burgos).

Al emprender las tareas de restauración de un monumento es de vital importancia conocer las causas de su degradación, así como el proceso que ha seguido a lo largo de los años. Para su investigación cobran gran importancia las técnicas no destructivas de análisis, puesto que éstas no significan ningún tipo de actuación sobre el monumento o destrucción de la muestra extraída de él.

Gracias a la termografía se puede detectar una mancha de humedad en una bóveda, o minúsculos agujeros en una vidriera de una iglesia. Pero también esta técnica es

muy útil en la restauración de pinturas, detectando con ella humedades y daños que han podido sufrir con el paso de los años (Figura 77).



Figura 77. Los Desposorios que pintó Goya, la escena del conjunto pictórico de Aula Dei que presenta más daños. Arriba, el detalle de una de las grietas de la pintura.

Los conservadores científicos de obras de arte analizan pigmentos, plagas de termitas o arrepentimientos (dibujos subyacentes en una pintura) con el fin de averiguar las incoherencias estilísticas, el grado de deterioro e incluso la autenticidad de un determinado bien cultural. Entre las técnicas que utilizan para resolver los enigmas ocultos de una obra están la reflectografía infrarroja, la microscopía electrónica de barrido o la termografía.

Con estas técnicas se tiene un diagnóstico certero de los problemas que sufren, y se consigue saber qué es lo que hay que hacer para devolverlas a un estado óptimo de conservación.

8.4. Fotografía infrarroja

La percepción del color es un hecho puramente psíquico y subjetivo; los colores, tal como los vemos, no existen fuera objetivamente, sino que se originan a través de la retina, en nuestra pantalla psíquica interior. El rango del espectro lumínico -entre 700 y 1.200 nanómetros- que capta la fotografía infrarroja es invisible al ojo humano, y sus aplicaciones van desde el arte a la ciencia. Hoy en día se emplea mucho en el terreno de la fotografía artística.

La fotografía infrarroja, pues, necesita una cámara con un filtro infrarrojo y una película sensible a la longitud de onda que emiten los objetos a fotografiar. Debido a las características de las tonalidades pictóricas que se obtienen con las fotografías infrarrojas, muchos artistas como Seth Mayer, Lindsay Garret, Donald Aaby o el prestigioso Simon Marsden (Figura 78) con sus instantáneas de corte gótico, han conseguido crear mundos espectrales o surrealistas.



Figura 78. Fotografía infrarroja de Simon Marsden

De entre las películas infrarrojas más populares, cabe destacar la Kodak infrared, y la Ilford sfx 200. Unas dan como resultado un color ficticio, y otras unos extraños tonos en blanco y negro.

8.4.1. Fotografía digital

Con el 'boom' de la fotografía digital, la técnica clásica de la fotografía infrarroja ha ido perdiendo adeptos. Hoy en día, experimentar con el infrarrojo en cámaras fotográficas digitales es posible en algunos casos inhabilitando a éstas el filtro "hot mirror" que las protege de esa radiación. Con esta simple operación se puede conseguir que algunas máquinas digitales del mercado, acoplándolas un filtro infrarrojo, consigan fotografías infrarrojas.

Los filtros infrarrojos tienen como misión suprimir la radiación ultravioleta y la totalidad o gran parte del espectro visible, dejando pasar a través del objetivo de la cámara solamente el espectro infrarrojo. Sin el filtro de infrarrojo, la película absorbería todo el espectro y dejaría el negativo inservible.

En el mercado se pueden encontrar diversos tipos de filtro infrarrojo, para según los casos o criterios personales. Se diferencian en la cantidad de espectro infrarrojo que dejan pasar. A mayor cantidad de espectro infrarrojo, el efecto en la película será también más acusado.



Figura 79.

Para conseguir ese efecto también se puede experimentar con programas de retoque fotográfico, como Photoshop u otros. Aunque esta alternativa es ampliamente denostada por los auténticos puristas aficionados a esta técnica fotográfica.

Capítulo 6 Aplicación Práctica

1. Objetivo

El objetivo del presente capítulo es aplicar la teoría descrita en el proyecto mediante un experimento práctico. En él, se buscará un método de captación de imágenes infrarrojas para su posterior análisis. Dicho análisis nos permitirá demostrar la posibilidad del reconocimiento de objetos que ofrece la termografía.

2. Desarrollo de la Práctica

Para cumplir el objetivo descrito es necesario un sistema de captura de imágenes infrarrojas. Lo más fiable y preciso sería utilizar una cámara termográfica como las descritas en el capítulo x. Sin embargo el alto coste de estas cámaras no está a nuestro alcance.

Otra opción es la utilización de una cámara doméstica a la que colocándole un filtro IR nos permitiera captar la radiación infrarroja que emiten los cuerpos. Esto se intentó con una cámara Réflex y un filtro IR R72 como el que se muestra en la Figura 80. Filtro IR Hoya R72



Figura 80. Filtro IR Hoya R72

Este filtro infrarrojo filtra la región visible dejando pasar las radiaciones infrarrojas y tiene su frecuencia de corte en los 720nm (ver Figura 81), dejando pasar la parte del espectro con mayor longitud de onda. Los de 720nm son los filtros más habituales en fotografía, aunque también se pueden encontrar de 850nm, 950nm...

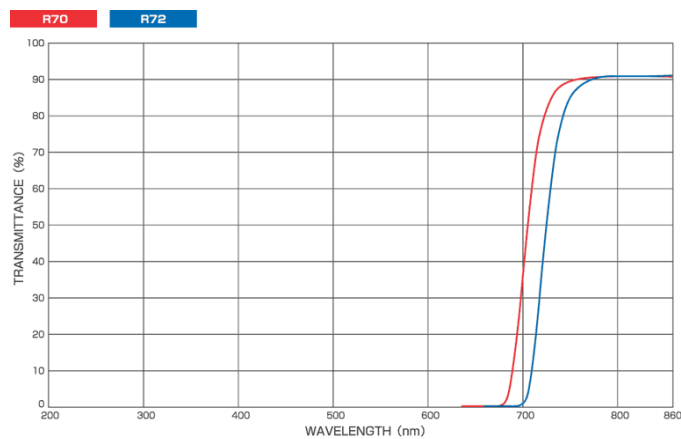


Figura 81. Función de transferencia del filtro Hoya R72

Sin embargo, al utilizar el filtro anterior incorporado a una cámara réflex se obtiene una imagen totalmente negra, ya que las cámaras incorporan un filtro que no deja pasar los rayos infrarrojos, y este tipo de cámaras semiprofesionales en concreto llevan un filtro de alta calidad.

El procedimiento que finalmente se llevó a cabo fue la construcción de una cámara infrarroja a partir de una webcam, el cual se va a describir a continuación.

2.1. Construcción de la Cámara Infrarroja

Para la construcción de la cámara infrarroja escogimos una cámara web Logitech como la que se muestra en la Figura 82 Como se comenta anteriormente las cámaras digitales disponen de un sensor, normalmente CMOS. Estos sensores son sensibles tanto a la luz visible como a la infrarroja. Para evitar que la parte infrarroja de la luz sature todos los colores generando una imagen irreal, el sensor lleva un filtro infrarrojo que deja pasar solamente la luz visible para el ojo humano.



Figura 82. Cámara web Logitech

La modificación que se hizo trató básicamente de eliminar ese filtro IR y sustituirlo por uno que elimine la luz visible y deje pasar solamente el infrarrojo. Para ello usamos un negativo fotográfico velado.

En primer lugar se desmontó la cámara. Tras abrir la carcasa (Figura 83izq.) y desenroscar la lente, llegamos al filtro IR, que se reconoce fácilmente por sus destellos de color morado y rojo (Figura 83 dcha.). Dicho filtro IR se reemplazó por uno nuevo.



Figura 83. Interior de la cámara web (izq.) y filtro IR (dcha.)

Para hacer el nuevo filtro se usó negativo fotográfico velado, cortando dos cuadrados del tamaño del sensor y se colocaron uno encima del otro, para conseguir filtrar la mayor cantidad de luz visible posible. Una vez colocado delante del sensor, volvemos a montar la cámara. De esta forma conseguimos nuestra cámara infrarroja.

Para comprobar que la cámara funciona, se captura la imagen de un mando a distancia pulsando los botones. Como podemos ver en la Figura 84 la cámara capta los rayos infrarrojos que emite el mando.

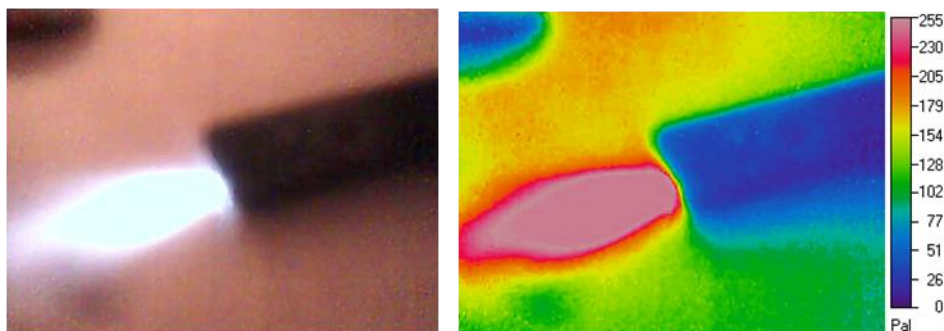


Figura 84. Fotografía infrarroja (izq.) y termograma (dcha.) de un mando a distancia.

De esta forma queda demostrado que la cámara construida recoge la radiación infrarroja.

2.2. Software

Para el análisis de las imágenes obtenidas mediante nuestra cámara web infrarroja, se utiliza MikroView (Figura 85), software libre desarrollado por Mikron Infrared, Inc.

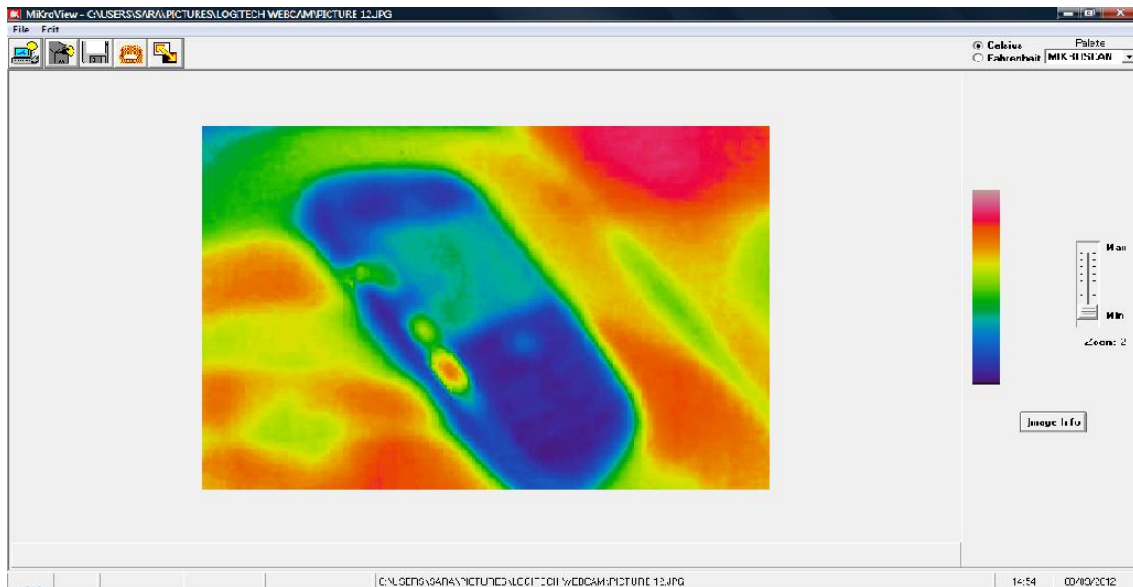


Figura 85. Captura de pantalla del software MikroView

A través de este programa se consigue un termograma, coloreando la imagen IR obtenida según la emisividad de rayos infrarrojos. De esta manera es más fácil distinguir las diferentes temperaturas de los cuerpos captados en la imagen.

2.3. Análisis de las imágenes

Para demostrar que se pueden reconocer objetos a partir de imágenes termográficas se tomaron varias fotografías, visualizándolas a continuación en el programa MikroView para analizar el termograma resultante.

Las imágenes que se muestran a continuación se han obtenido mediante el método de Termografía Pasiva (ver pág.30).

Ejemplo 1

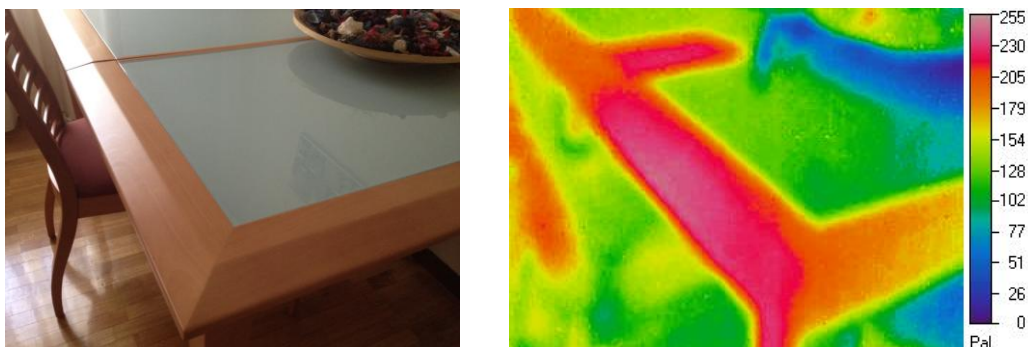


Figura 86. Fotografía (izq.) y termograma (dcha.) de una mesa de madera y cristal.

Hemos realizado una fotografía de una mesa compuesta de dos materiales diferentes, madera y cristal (Figura 86), para comprobar que la emisividad es diferente según el material.

Como se puede ver en el termograma, la madera emite mayor radiación infrarroja que el cristal, ya que aparece en color rojizo. Esto se debe a que el cristal es más reflectante, y por lo tanto su emisividad es menor (ver pág. 25). Como se comprueba en la tabla del anexo, la emisividad de la madera es de 0,94 a 70°C y la del vidrio, 0,94 a 90°C (Tabla 6).

Esto nos lleva a que la radiación infrarroja no sólo viene determinada por la temperatura, sino también por el material de los cuerpos.

Ejemplo 2

Al igual que en el ejemplo anterior, en el siguiente termograma (Figura 87) se ve como en una camiseta de algodón (emisividad de 0,77 a 20°C, Anexo 1 Tabla 6) con un detalle en otro material, se aprecia diferente radiación infrarroja

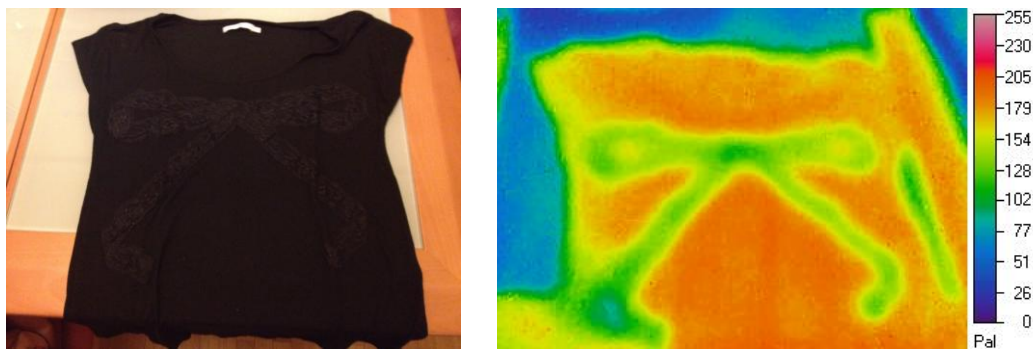


Figura 87. Fotografía (izq.) y termograma (dcha.) de una camiseta

A continuación, en la Figura 88, se compara esta misma camiseta con otra de diferente color para ver como el color también influye en la emisividad.

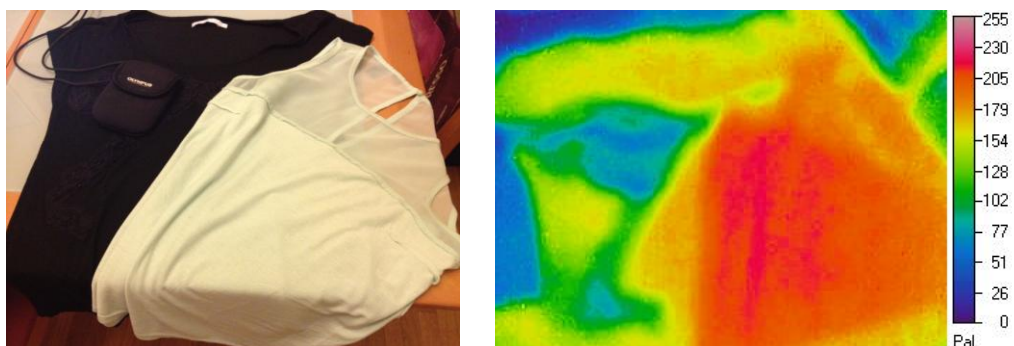


Figura 88. Fotografía (izq.) y termograma (dcha.) de dos camisetas de diferente color

Ejemplo 3

En este ejemplo se ve cómo influye la temperatura en la emisividad, utilizando dos objetos iguales, del mismo material, pero con diferentes temperaturas. Para ello se usaron dos espátulas de madera (0,94 a 70°C, Anexo 1 Tabla 6)), calentando una de ellas y enfriando la otra en el congelador.

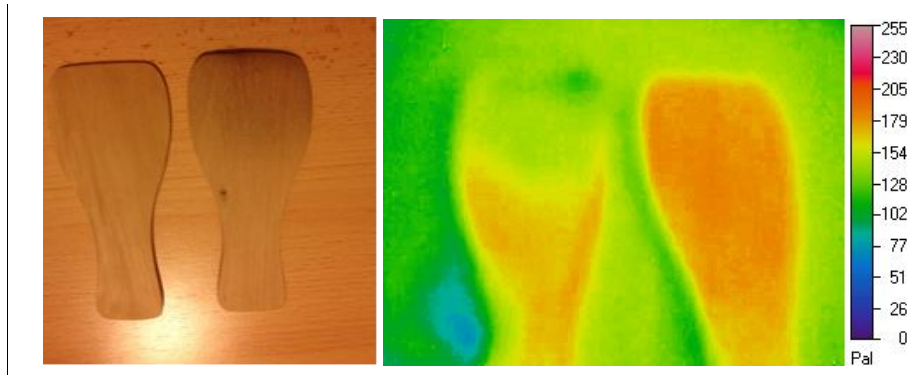


Figura 89. Fotografía (izq.) y termograma (dcha.) de dos espátulas iguales a diferentes temperaturas.

Ejemplo 4

La siguiente figura muestra una botella de cristal enfriada en una nevera a 5°C y un cargador de un ordenador portátil a 40°C.

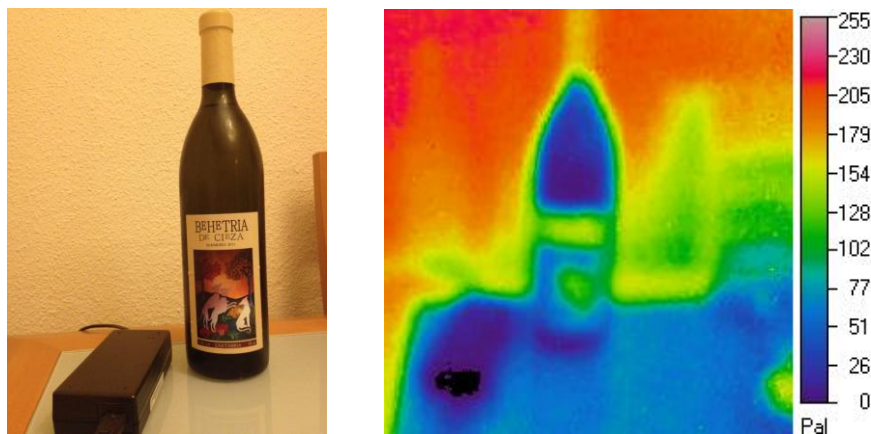


Figura 90. Fotografía (izq.) y termograma (dcha.) de una botella fría y un cargador caliente

Como se puede ver, a pesar de tener temperaturas muy diferentes, los dos objetos aparecen del mismo color, es decir, emiten una radiación infrarroja similar.

Teniendo en cuenta que el cargador, siendo de plástico, tiene una emisividad de 0,94 a 20°C, mientras que el vidrio tiene la misma emisividad a 90°C (Anexo 1 Tabla 6), se llega a la conclusión de que por mucha diferencia de temperatura que

haya, si los materiales de medida tienen emisividades tan diferentes, dicha diferencia de temperatura no se puede apreciar en el procedimiento usado en esta práctica.

Capítulo 7 Conclusiones

Tras el estudio de los principios, funcionamiento y las aplicaciones de la termografía infrarroja, se llega a la conclusión de que presenta ciertas ventajas.

Ya que es una técnica no destructiva, disminuye las interrupciones en los procesos productivos y se controla la integridad del sistema que los alimenta y protege. El ahorro final depende del intervalo de tiempo en que se realice el mantenimiento predictivo. La inspección se realiza a distancia, sin contacto físico con la pieza a inspeccionar, por lo que se pueden inspeccionar zonas inaccesibles o peligrosas sin poner fuera de servicio las instalaciones, y sin entrañar riesgo para el operador.

Además, permite la detección exacta del punto defectuoso en tiempo cuasi-real, lo que permite cuantificar la gravedad y repercusión del defecto además de

programar las acciones necesarias de mantenimiento. En consecuencia, se disminuyen las actuaciones de mantenimiento tradicional: las anomalías se predicen con suficiente antelación para que sean reparadas y no se llegue a producir una avería que supondría un considerable tiempo de reparación.

Al poder realizar un seguimiento preventivo del funcionamiento de los equipos es posible corregir las anomalías detectadas en el menor tiempo posible para alargar su vida útil.

Permite un uso más eficiente de la energía, ya que posibilita una disminución del consumo de los equipos de calefacción/refrigeración actuando sobre las causas que originan pérdidas de frío o de calor. Se consigue, por tanto, un ahorro económico y un menor impacto sobre el medio ambiente.

Sin embargo la termografía también tiene algunas limitaciones, como por ejemplo su alto coste, ya que requiere el empleo de recursos de soportes y programas informáticos que suponen inversiones significativas. Además las cámaras termográficas de calidad tienen precios altos y requieren operarios con formación especializada y una amplia experiencia.

Por otro lado, las imágenes pueden ser difíciles de interpretar con precisión cuando se basa en ciertos objetos, concretamente aquellos con temperaturas erráticas o con defectos internos si no se manifiestan externamente por incremento de la temperatura.

Como se desprende de los ejemplos prácticos, las mediciones de la temperatura se ven dificultadas por emisividades diferentes, los reflejos de otras superficies y la precisión de las cámaras, que no son tan exactas como los métodos de contacto. Sin embargo, aunque no sea posible en todos los casos detectar las temperaturas con exactitud, sí que es posible distinguir y reconocer objetos con diferente radiación infrarroja.

Bibliografía

Artículos consultados

Detección de Peatones en el Espectro Visible e Infrarrojo para un Sistema Avanzado de Asistencia a la Conducción

Cristina Hilario Gómez

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Universidad Carlos III de Madrid

Leganés, Octubre de 2008

Termographic Image Processing for NDT

Clemente Ibarra-Castanedo, Abdelhakim Bendada and Xavier Maldade

Electrical and Computing Engineering Department

Quebec City (Quebec) G1V 0A6 Canada.

Infrared Thermography Advances

John R. Snell Jr.

Robert W. Spring

October 2, 2007

Experimental Comparison of Lock-in and Pulsed Thermography for the Nondestructive Evaluation of Aerospace Materials

W. Ben Larbi, C. Ibarra-Castanedo, M. Klein , A. Bendada, and X. Maldague

Electrical and Computing Engineering Department, Université Laval,

Quebec City (Quebec) G1V 0A6 Canada.

Analysis of Ultrasonic Elastic Waves in Vibrothermography using FEM

W. Ben Larbi, C. Ibarra-Castanedo, M. Klein , A. Bendada, and X. Maldague

Electrical and Computing Engineering Department, Université Laval,

Quebec City (Quebec) G1V 0A6 Canada.

Neonatal Infrared Thermography Image Processing

Lluís Bayo Catalan

Helmholtz-Institute For Biomedical Engineering Rwth Aachen

Procesamiento de imágenes infrarrojas para la detección de defectos en materiales.

Hernán D Benítez¹, Clemente Ibarra-Castanedo², Abdelhakim Bendada³, Xavier Maldague⁴, Humberto Loaiza⁵, Eduardo Caicedo⁶

Contribuciones a las técnicas no destructivas para evaluación y prueba de procesos y materiales basadas en radiaciones infrarrojas.

Daniel Aquilino González Fernández

Universidad de Cantabria

Termografía Infrarroja Aérea: Una Herramienta en el Manejo de Propiedades Para Operadores de Sistemas de Calentamiento de un Distrito Determinado

Greg Stockton

Stockton Infrared Thermographic Services, Inc.

Detección de incendios forestales con cámaras termográficas en Soria

Elena Soria Abad

Aplicación de la termografía al estudio de pérdidas energéticas en edificios.

G. SANGLIER

Dpto. de Observación de la Tierra, Teledetección y Atmósfera. INTA.

Torrejón de Ardoz, Madrid

Thermographic Inspection of Rotor Blades

Peter MEINLSCHMIDT, Jochen ADERHOLD

Fraunhofer-Institute for Wood Research (WKI), Braunschweig, Germany

A review of NDT techniques for wind turbines

M A Drewry and G A Georgiou

Aplicaciones de la termografía infrarroja y la espectrorradiometría en el estudio del deterioro del patrimonio arquitectónico nacional

J. A Cusido, M. Devant y J. Riba

Institut de Tecnologia i Modelització Ambiental (UPC)

Cataluña

Páginas Web

Termografía infrarroja como ensayo no destructivo: detección de defectos en componentes aerospaciales

<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/11149-Termografia-infrarroja-ensayo-no-destructivo-deteccion-defectos-componentes-aerospaciales.html>

Obtesol, Observatorio Tecnológico de Soldadura

http://www.obtesol.es/index.php?option=com_content&task=view&id=2794&Itemid=31

Xuletas – Principios de la Termografía

<http://www.xuletas.es/ficha/principios-de-la-termografia-1/>

QuimiNet, Información y Negocios Segundo a Segundo

<http://www.quiminet.com>

Universidad de Castilla y La Mancha

<http://www.info-ab.uclm.es/labelec/solar/otros/infrarrojos/fotodetectores.htm>

Cosmos, Tu Interfaz de Negocios

<http://www.cosmos.com.mx/j/tec/b1cx.htm>

SI Termografía Infrarroja

<http://www.termografia.com>

Jenck S.A, Instrumental Analítico

<http://www.jenck.com/productos/?idSubtecnica=10&idProducto=119&PHPSESSID=iljzfhqhsr#tab=0>

HGH, Systemes Infrarouges

<http://www.hgh.fr/scanner-infrarouge-thermographie-infrared-thermography-es.php>

Rockwool

<http://www.rockwool.es/eficiencia+energ%C3%A9tica/stop+local+warming/termograf%C3%ADas>

Termografía Infrarroja, Soluciones en Imágenes Térmicas

<http://www.termografia.com.mx>

solomantenimiento.com, Portal de Mantenimiento e Industria

<http://www.solomantenimiento.com/m-termografia.htm>

investigaciondeincendios.com, Laboratorio de Ingeniería Forense

<http://estudios-termograficos.investigaciondeincendios.com/termografia-industria/>

monografias.com - Mantenimiento Industrial. Termografía

<http://www.monografias.com/trabajos92/termografia-mantenimiento/termografia-mantenimiento.shtml#aplicacioa>

InfraTec, Thermal imaging cameras for infrared thermography

<http://www.infratec.de/index.php?id=55&L=2>

Soliclima, Energía Solar

<http://news.soliclima.com/divulgacion/eficiencia-energetica/la-termografia-aplicada-a-los-edificios>

Net-wind, Mantenimiento de parques eólicos

<http://www.net-wind.es/servicio-28-16-mantenimiento-predictivo-y-preventivo.php>

Icarus Solar, Energía solar, térmica y fotovoltaica

<http://www.icarus-solar.com/esFotovoltaica/instalacionesaisladas.html>

SoloStocks, mercado mayorista online de compraventa para empresas

<http://www.solostocks.com/venta-productos/negocios/industria/paneles-fotovoltaicos-en-stock-3000420>

Voltimum, portal europeo líder de la instalación eléctrica

<http://www.voltimum.es/news/7484/cm/utilizacion-de-la-termografia-en-plantas-fotovoltaicas.html>

Bottup – El mundo mágico de la fotografía infrarroja

<http://www.bottup.com/200902114302/cultura/el-mundo-magico-de-la-fotografia-infrarroja.html>

El Mundo – Termografía en la restauración

<http://www.elmundo.es/magazine/2004/241/1083683781.html>

Heraldo de Soria - La restauración de las pinturas de Goya en la Cartuja de Aula Dei empezará en 2009

<http://www.heraldodesoria.es/index.php/mod.noticias/mem.detalle/idnoticia.10520/relcategoria.308>

FLIR, The World Leader in Thermal Imaging

<http://www.flir.com>

Nivela, Equipos de topografía, acústica y termografía

<http://www.nivelatermografia.net/termografia>

Goa Ibérica Tecnologías SL, diagnóstico de maquinaria

<http://goaiberica.es/uploadarchivos/vt.pdf>

Universidad Complutense de Madrid – Servicio de termografía aplicada a la edificación

<http://www.ucm.es/info/fisatom/docencia/Masterfisica/Renovables/info%20complementaria/Termografia%20aplicada%20ala%20edificacion.pdf>

Imedia Comunicación – Control de calidad en instalaciones fotovoltaicas

http://www.imediapr.es/relatiosolar-documentos_files/control-calidad-instalaciones-fotovoltaicas.pdf

Anexo A

1. Tabla de emisividad de diferentes materiales

Tabla 6. Emisividades de diferentes materiales

Material	Temperatura	ϵ
Aluminio, laminado brillante	170 °C	0,04
Asbestos	20 °C	0,96
Asfalto	20 °C	0,93
Algodón	20 °C	0,77
Hormigón	25 °C	0,93
Plomo, gris oxidado	20 °C	0,28
Plomo, muy oxidado	20 °C	0,28
Techo de fieltro	20 °C	0,93
Hielo, brillante	0 °C	0,97
Hielo, irregular	0 °C	0,99
Hierro, esmerilado	20 °C	0,24
Hierro brillante -grabado	150 °C	0,13
Hierro con cuero	100 °C	0,80
Hierro con láminas de cuero	20 °C	0,77
Hierro ligeramente oxidado	20 °C	0,61
Hierro muy oxidado	20 °C	0,85
Tierra cultivada arada	20 °C	0,38
Tierra, arcilla negra	20 °C	0,66
Tejas	25 °C	0,93
Yeso	20 °C	0,90
Vidrio	90 °C	0,94
Oro, pulido	130 °C	0,02
Caucho duro	23 °C	0,94
Caucho gris blando	23 °C	0,86
Madera	70 °C	0,94
Guijarro	90 °C	0,95
Corcho	20 °C	0,70
Esmeril rojo (desigual)	80 °C	0,86
Cámara calor, negra anodizada	50 °C	0,98
Cobre, ligeramente mate	20 °C	0,04
Cobre, oxidado	130 °C	0,76
Cobre, pulido	20 °C	0,03
Cobre, negro oxidado	20 °C	0,78
Plásticos (PE,PP, PVC)	20 °C	0,94
Hojas	20 °C	0,84
Mármol, blanco	20 °C	0,95
Recubrimiento de minio pintura	100 °C	0,93
Latón, oxidado	200 °C	0,61
NATO-verde	50 °C	0,85
Papel	20 °C	0,97
Porcelana	20 °C	0,92
Pizarra	25 °C	0,95
Pintura negra (mate)	80 °C	0,97
Seda	20 °C	0,78
Plata	20 °C	0,02
Acero (superficie tratamiento calor)	200 °C	0,52
Acero oxidado	200 °C	0,79
Arcilla, cocida	70 °C	0,91
Pintura transformadora	70 °C	0,94
Água	38 °C	0,67
Ladrillo, mortero, yeso	20 °C	0,93
Zinc blanco (pintura)	20 °C	0,95

