



universidad  
de león



# Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

## GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Fin de Grado

Termografía: Fundamentos y aplicaciones

Thermography: Fundamentals and applications

Autor: José Manuel Arias Bermejo

Tutor: Ana Isabel Fernández Abia

(Septiembre, 2023)

UNIVERSIDAD DE LEÓN

Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Fin de Grado

**ALUMNO:** José Manuel Arias bermejós

**TUTOR:** Ana Isabel Fernández Abia

**TÍTULO:** Termografía: Fundamentos y aplicaciones

**TITLE:** Thermography: Fundamentals and applications

**CONVOCATORIA:** Septiembre, 2023

La termografía infrarroja es una técnica de detección y visualización de la radiación infrarroja emitida por los objetos, que ha demostrado tener diversas aplicaciones en diferentes campos. Para comprender su importancia y utilidad, es necesario entender su contexto histórico y los principios físicos en los que se basa

Los principios físicos tras las ondas y la radiación electromagnética el cual se consideran fundamentales para comprender cómo funcionan los sistemas de termografía infrarroja. La radiación infrarroja es una forma de energía que se transmite en forma de ondas electromagnéticas y se relaciona con la temperatura de los objetos. Esta energía puede ser detectada y convertida en imágenes térmicas, lo que permite visualizar la distribución de temperaturas en una superficie.

La transmisión de calor por radiación es un fenómeno importante en la termografía, ya que los objetos emiten radiación infrarroja en función de su temperatura. Esta radiación es

capturada por una cámara termográfica y se convierte en una imagen térmica que muestra las variaciones de temperatura en una escala de colores.

La termografía teórica proporciona las bases para comprender los conceptos y principios detrás de la técnica. Además, existen guías termográficas de buenas prácticas que establecen pautas para realizar inspecciones termográficas precisas y confiables.

La termografía infrarroja se utiliza en una amplia gama de campos y aplicaciones. Por ejemplo, se aplica en la industria para el mantenimiento predictivo de equipos eléctricos y mecánicos, la detección de fugas de energía en edificios, el control de calidad en la producción industrial y la monitorización de procesos industriales.

Se analizaron varios casos prácticos de inspecciones termográficas en diferentes áreas, como la detección de fallos eléctricos en alternadores, la identificación de infiltraciones de agua en edificios y la detección de anomalías en paneles solares fotovoltaicos, entre otros.

Además, se han abordado tres aplicaciones potenciales destacadas de la termografía infrarroja: la aplicación en fluidos, que permite determinar la concentración de especies gaseosas y temperatura; la evaluación de la morfología de electrodos creados por fabricación aditiva, para garantizar su calidad y rendimiento; y la detección de grietas en placas metálicas mediante la vibrotermografía, una técnica que utiliza vibraciones para revelar defectos ocultos.

#### ABSTRACT:

Infrared thermography is a technique for detecting and visualizing the infrared radiation emitted by objects, which has demonstrated diverse applications in various fields. To understand its importance and usefulness, it is necessary to grasp its historical context and the underlying physical principles.

The physical principles behind waves and electromagnetic radiation are considered fundamental to understanding how infrared thermography systems work. Infrared radiation is a form of energy transmitted in the form of electromagnetic waves and is related to the temperature of objects. This energy can be detected and converted into thermal images, allowing for the visualization of temperature distributions on a surface.

Radiative heat transfer is an important phenomenon in thermography since objects emit infrared radiation based on their temperature. This radiation is captured by a thermographic

### III

camera and transformed into a thermal image that displays temperature variations on a color scale.

Theoretical thermography provides the foundations for understanding the concepts and principles behind the technique. In addition, there are thermographic guidelines for best practices that establish guidelines for accurate and reliable thermographic inspections.

Infrared thermography is used in a wide range of fields and applications. For example, it is applied in industry for predictive maintenance of electrical and mechanical equipment, detection of energy leaks in buildings, quality control in industrial production, and monitoring of industrial processes.

Several practical cases of thermographic inspections have been analyzed in various areas, such as the detection of electrical faults in alternators, identification of water infiltrations in buildings, and detection of anomalies in photovoltaic solar panels, among others.

Furthermore, three notable potential applications of infrared thermography have been addressed: application in fluids, allowing for the determination of gas species concentration and temperature; evaluation of the morphology of electrodes created by additive manufacturing, to ensure their quality and performance; and detection of cracks in metal plates through vibrothermography, a technique that utilizes vibrations to reveal hidden defects.

**Palabras clave:** Termografía infrarroja, radiación electromagnética, aplicaciones industriales, inspecciones termográficas

Firma del alumno:

VºBº Tutor/es:



# Índice de contenidos

<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>XX</b>
<b>GLOSARIO DE TÉRMINOS</b> .....	<b>XXII</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>25</b>
1.1 CONTEXTO HISTÓRICO .....	25
1.2 APROXIMACIÓN A LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA .....	30
1.3 QUE ES LA TERMOGRAFÍA .....	32
<b>2 FUNDAMENTOS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA</b> .....	<b>33</b>
2.1 FUNDAMENTOS .....	33
2.1.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS.....	33
2.1.2 ELEMENTOS DE LAS ONDAS .....	35
2.1.3 FENOMENOS ASOCIADOS A LAS ONDAS .....	36
2.2 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA .....	37
2.2.1 ESPECTRO VISIBLE.....	38
2.2.2 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO .....	40
2.3 TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN.....	44
2.3.1 RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO .....	45
2.3.2 INTENSIDAD DE RADIACIÓN.....	52
2.3.2.1 INTENSIDAD DE RADIACIÓN EMITIDA .....	53
2.3.2.2 ANGULO SÓLIDO .....	53
2.3.2.3 INTENSIDAD DE RADIACIÓN EMITIDA .....	54
2.3.2.4 RADIACIÓN INCIDENTE.....	55
2.3.2.5 RADIOSIDAD .....	57
2.3.2.6 CANTIDADES ESPECTRALES .....	57
2.4 TERMOGRAFÍA TEORÍCA .....	59

## VI

2.4.1	LA CÁMARA TERMOGRÁFICA.....	59
2.4.1.1	CLASIFICACIÓN DE LAS CÁMARAS TERMOGRÁFICAS.....	59
2.4.1.2	PARTES DE UNA CÁMARA TERMOGRÁFICA.....	64
2.4.1.3	FUNCIONAMIENTO DE UNA CAMARA TERMOGRÁFICA.....	65
2.4.1.4	CARACTERISTICAS CLAVE A CONSIDERAR PARA ELEGIR UNA CÁMARA TERMOGRÁFICA.....	66
2.4.2	CALIBRACIÓN.....	69
2.4.3	FUNCIONALIDADES AVANZADAS DE LAS CÁMARAS TERMOGRÁFICAS.....	70
2.4.4	REFLEXIONES EN LA MEDICIÓN TERMOGRÁFICA.....	76
2.4.5	EMISIÓN, REFLEXIÓN, TRANSMISIÓN.....	77
2.4.5.1	EMISIVIDAD $\epsilon$ .....	78
2.4.5.2	REFLEXIÓN $\rho$ .....	79
2.4.5.3	TRANSMISIÓN $\tau$ .....	80
2.4.5.4	LEY DE LA RADIACIÓN DE KIRCHOFFS.....	81
2.4.5.5	CORRELACIÓN ENTRE EMISIÓN Y REFLEXIÓN.....	82
2.4.5.6	CONSIDERACIONES Y LIMITACIONES EN LA MEDICIÓN TERMOGRÁFICA.....	84
2.4.6	DISTANCIA DE MEDICIÓN Y TAMAÑO DEL OBJETO.....	85
<b>3</b>	<b>GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS.....</b>	<b>88</b>
3.1	EL OBJETO MEDIDO.....	88
3.2	EL ENTORNO DEL OBJETO MEDIDO.....	90
3.3	CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE LA TERMOGRAFÍA EN EXTERIORES.....	93
3.4	DETERMINACIÓN PRÁCTICA DE LA EMISIVIDAD.....	94
3.5	ERRORES DE DIAGNÓSTICO EN LA MEDICIÓN POR INFRARROJOS.....	95
3.6	CONDICIONES AMBIENTALES IDEALES PARA LA MEDICIÓN POR INFRARROJOS.....	100
3.7	CONSIDERACIONES PARA LA CAPTURA DE IMÁGENES TÉRMICAS PRECISAS.....	102
3.8	HERRAMIENTAS HABITUALES DEL TERMÓGRAFO.....	105
3.9	INTERPRETACIÓN DE LA IMAGEN TÉRMICA.....	107
3.10	ANÁLISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO.....	108
3.11	LA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA.....	110
3.11.1	BENEFICIOS DE LA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA.....	111

## VII

3.11.2	<i>METODOLOGÍA DE LA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA</i> .....	112
3.11.3	<i>INFORME DE INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA</i> .....	113
3.11.4	<i>CERTIFICACIÓN Y COMPETENCIA PROFESIONAL EN TERMOGRAFÍA</i> .....	115
3.11.4.1	REQUISITOS DE FORMACIÓN Y CAPACITACIÓN EN TERMOGRAFÍA .....	115
3.11.4.2	NORMATIVAS Y ESTÁNDARES DE CERTIFICACIÓN.....	115
3.11.4.3	NIVELES DE COMPETENCIA (NIVEL I, NIVEL II, NIVEL III) Y TAREAS ASOCIADAS A CADA NIVEL. 116	
3.11.5	<i>GARANTIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS INSPECCIONES TERMOGRÁFICAS</i> .....	117
3.11.6	<i>VENTAJAS DE CONTAR CON TÉCNICOS CERTIFICADOS</i> .....	118
<b>4</b>	<b><i>APLICACIONES DE LA TERMOGRAFÍA</i></b> .....	<b>120</b>
4.1	<i>TERMOGRAFÍA EN EDIFICOS</i> .....	120
4.1.1	<i>INSPECCIÓN CUALITATIVA Y CUANTITATIVA</i> .....	121
4.1.2	<i>INSPECCIÓN INTERNA O EXTERNA</i> .....	122
4.1.3	<i>DEFECTOS DETECTABLES</i> .....	122
4.1.3.1	DEFECTO DE AISLAMIENTO.....	122
4.1.3.2	FUGAS DE AIRE .....	123
4.1.3.3	DETECCIÓN DE HUMEDAD .....	124
4.1.3.4	PUENTES TÉRMICOS .....	124
4.1.3.5	LÍNEAS DE ABASTECIMIENTO Y CALEFACCIÓN CENTRAL .....	125
4.1.3.6	FILTRACIONES DE AGUA EN TEJADOS PLANOS .....	126
4.1.3.7	FUGAS DE CALEFACCIÓN DE SUELO .....	127
4.1.3.8	CONTROL DE CALIDAD .....	128
4.1.3.9	REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS.....	129
4.1.3.10	TUBERÍAS.....	129
4.1.3.11	INSTALACIONES DE CLIMATIZACIÓN .....	130
4.1.4	<i>RECOMENDACIONES PARA LLEVAR A CABO UNA INSPECCIÓN RESIDENCIAL MEDIANTE TERMOGRAFÍA INFRARROJA</i> .....	130
4.1.5	<i>BLOWER DOOR</i> .....	132
4.1.5.1	BLOWER DOOR RESIDENCIAL.....	134
4.1.5.2	BLOWER DOOR PARA PASSIVHAUS .....	135

## VIII

4.1.5.3	BLOWER DOOR PARA GRANDES EDIFICIOS .....	135
4.1.5.4	BLOWER DOOR PARA EVALUACIÓN DE ESTANQUEIDAD.....	136
4.2	MANTENIMIENTO PREDICTIVO .....	137
4.2.1	SISTEMAS ELÉCTRICOS.....	141
4.2.1.1	INSTALACIONES DE ALTA TENSIÓN.....	142
4.2.1.2	INSTALACIONES DE BAJA TENSIÓN .....	142
4.2.2	SISTEMAS MECÁNICOS .....	143
4.2.3	INSTALACIONES DE CONDUCTOS, TUBERÍAS Y VÁLVULAS .....	144
4.2.4	SISTEMAS TÉRMICOS, REFRACTARIOS Y PETROQUÍMICOS .....	145
4.3	INDUSTRIA DE LAS ENERGÍA RENOVABLES .....	146
4.3.1	TURBINAS EÓLICAS .....	146
4.3.2	PANELES SOLARES .....	149
4.4	FABRICACIÓN ADITIVA.....	149
4.4.1	CONTROL DE PROCESOS MONITOREADOS Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD .....	149
4.4.2	RESQUISITOS DE LAS CÁMARAS INFRARROJAS PARA LA FABRICACION ADITIVA POR LÁSER	150
4.5	INDUSTRIA AUTOMOVILÍSTICA.....	150
4.6	INDUSTRIA LÁSER .....	152
4.6.1.1	SINTERIZACIÓN POR LÁSER.....	153
4.6.1.2	CORTE POR LÁSER.....	154
4.6.1.3	SOLDADURA POR LÁSER.....	154
4.6.2	VENTAJAS Y RESULTADOS DEL CONTROL DE PROCESOS CON TERMOGRAFÍA.....	156
4.7	ÁMBITO MILITAR .....	157
4.7.1.1	PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS PARA LA DETECCIÓN DE INFLTRACIONES DE AGUA EN ESTRUCTURAS AERONAUTICAS.....	157
4.7.1.2	SEGURIDAD NACIONAL.....	159
4.7.1.3	DETECCIÓN DE MOVIMIENTO EN SISTEMAS DE DEFENSA .....	161
4.7.1.4	DETECCIÓN DE PEATONES .....	161
4.8	TERMOGRAFÍA AÉREA .....	162
4.8.1	EXTINCIÓN DE INCENDIOS DESDE EL AIRE .....	162

4.8.2	INVESTIGACIÓN AGRÍCOLA Y AGRICULTURA DE PRECISIÓN .....	163
4.8.3	MAPEO DE INCENDIOS.....	163
4.8.4	INVESTIGACIÓN GEOGRÁFICA .....	165
4.8.5	MAPEO TÉRMICO .....	165
4.8.6	INSPECCIÓN AÉREA Y MANTENIMIENTO DE LÍNEAS ELÉCTRICAS.....	166
4.9	SEGURIDAD Y VIGILANCIA .....	166
4.10	INDUSTRIA QUÍMICA .....	168
4.11	INDUSTRIA DEL VIDRIO .....	169
4.12	INDUSTRIA METALÚRGICA .....	170
4.13	INDUSTRIA DE LOS PLÁSTICOS.....	171
4.14	INDUSTRIA MÉDICA.....	172
4.15	GEOLOGÍA.....	174
4.16	GANADERÍA, AGRICULTURA Y VIDA SILVESTRE .....	175
4.17	TERMOGRAFÍA ESPECTRAL .....	176
4.18	TERMOGRAFÍA DE ALTA VELOCIDAD .....	177
4.19	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	178
4.20	ANÁLISIS DE TENSIÓN Y FATIGA .....	179
4.21	SISTEMAS ELECTRÓNICOS .....	179
4.22	PEGADO Y SELLADO .....	180
<b>5</b>	<b>INSPECCIONES TERMOGRÁFICAS.....</b>	<b>182</b>
5.1	INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA DE UN ALTERNADOR .....	182
5.1.1	DESCRIPCIÓN DEL PATRULLERO TABARCA (P-28) .....	183
5.1.2	PREPARACIÓN DEL EQUIPO DE INSPECCIÓN .....	184
5.1.3	RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN .....	185
5.2	INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA INSTALACIONES DE BAJA TENSIÓN .....	189
5.2.1.1	INTRODUCCIÓN .....	189
5.2.1.2	ALCANCE DE LA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA.....	189
5.2.2	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN DE AVERÍAS.....	190
5.2.3	DATOS PRESENTADOS.....	192

5.2.4	<i>EVALUACIONES TERMOGRÁFICAS</i> .....	193
5.2.4.1	EVALUACIÓN N°1.....	194
5.2.4.2	EVALUACIÓN N°2.....	196
5.2.4.3	EVALUACIÓN N°3.....	198
5.2.4.4	EVALUACIÓN N°4.....	200
5.3	<i>INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA DE INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA</i> .....	202
5.3.1	<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	202
5.3.1.1	OBJETIVO .....	202
5.3.1.2	CONTEXTO E IMPORTANCIA DE LA INSPECCIÓN TERMOGRAFICA EN PANELES SOLARES.....	202
5.3.2	<i>METODOLOGÍA DE LA INSPECCIÓN</i> .....	203
5.3.2.1	CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA ADECUADA .....	203
5.3.3	<i>METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN DE PANELES SOLARES</i> .....	204
5.3.3.1	TÉCNICA TERMOGRÁFICA UTILIZADA.....	204
5.3.3.2	EQUIPO UTILIZADO .....	206
5.3.3.3	PARAMETROS Y CONDICIONES DE LA INSPECCIÓN.....	207
5.3.4	<i>PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN</i> .....	208
5.3.4.1	UBICACIÓN Y DISPOSICIÓN DE LOS PANELES .....	208
5.3.4.2	DESCRIPCIÓN DE LA INSPECCIÓN PASO A PASO.....	209
5.3.4.3	COLOCACIÓN DE LA CÁMARA.....	210
5.3.4.4	OBSERVACIONES A GRANDES DISTANCIAS.....	212
5.3.4.5	OBSERVACIONES DESDE UNA PERSPECTIVA DIFERENTE .....	213
5.3.4.6	ERRORES DE MEDICIÓN.....	213
5.3.5	<i>ANÁLISIS DE RESULTADOS</i> .....	214
5.3.5.1	IMPACTO EN RENDIMIENTO Y EFICIENCIA .....	214
5.3.5.2	DEFECTOS DETECTABLES MEDIANTE TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....	219
5.3.5.3	EVALUACIÓN DE ANOMALÍAS Y AREAS PROBLEMATICAS .....	221
<b>6</b>	<b><i>APLICACIONES POTENCIALES DE LA TERMOGRAFÍA</i></b> .....	<b>224</b>
6.1	<i>APLICACIONES DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA PARA EL ESTUDIO DE FLUIDOS</i> .....	224
6.1.1	<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	225
6.1.2	<i>MEDICIONES EN LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA</i> .....	227

## XI

6.1.2.1	DISPOSITIVOS DE MEDIDA Y MÉTRICAS .....	229
6.1.2.2	DISPOSICIÓN EXPERIMENTAL Y CONSIDERACIONES.....	234
6.1.2.3	TÉCNICAS DE DECONVOLUCIÓN INVERSA .....	237
6.1.2.4	INCERTIDUMBRES, ASUNCIONES E INFLUENCIA DEL ANÁLISIS .....	239
6.1.2.5	DESARROLLO ESPACIAL Y VELOCIMETRÍA .....	241
6.1.2.6	TURBULENCIA Y CARACTERÍSTICAS DE INESTABILIDAD DEL FLUJO.....	245
6.1.2.7	DISTRIBUCIÓN DE LOS TIPOS DE GAS EN LOS FLUJOS .....	251
6.1.2.8	DISTRIBUCIONES DE TEMPERATURA.....	257
6.1.2.9	DISTRIBUCIONES SIMULTÁNEAS DE ESPECIES Y TEMPERATURAS.....	261
6.1.3	<i>EVALUACIÓN DE LAS SIMULACIONES.....</i>	<i>269</i>
6.1.4	<i>ANÁLISIS DE FLUJOS CON APLICACIONES PRÁCTICAS .....</i>	<i>274</i>
6.1.4.1	IDENTIFICACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN Y MEZCLA DE GASES .....	275
6.1.4.2	MEDICIONES DE TEMPERATURA EFECTIVA .....	277
6.1.4.3	OBTENCIÓN DE IMAGENES CON FIBRA ÓPTICA .....	278
6.1.4.4	ACOPLAMIENTO DE TÉCNICAS LÁSER.....	279
6.1.4.5	INTERACCIÓN SUPERFICIE-FLUJO.....	281
6.1.4.6	CÁLCULO DE CAMPOS DE VELOCIDADES, TEMPERATURAS Y CONCENTRACIONES .....	282
6.1.4.7	CÁLCULO DE VALORES ESCALARES.....	283
6.2	DETECCIÓN DE LA MORFOLOGÍA DE ELÉCTRODOS FLEXIBLES CONFORMADOS A PARTIR DE FABRICACIÓN ADITIVA .....	284
6.2.1	<i>INTRODUCCIÓN .....</i>	<i>284</i>
6.2.2	<i>MATERIALES Y MÉTODOS.....</i>	<i>285</i>
6.2.3	<i>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</i>	<i>286</i>
6.3	INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA SOBRE LA DETECCIÓN DE GRIETAS POR FATIGA EN PLACA METÁLICA MEDIANTE VIBRO-TERMOGRAFÍA. ....	290
6.3.1	<i>INTRODUCCIÓN .....</i>	<i>290</i>
6.3.2	<i>VIBROTERMOGRAFÍA.....</i>	<i>291</i>
6.3.3	<i>TRANSFORMADA DE FOURIER.....</i>	<i>292</i>
6.3.4	<i>MATERIALES Y PROBETAS .....</i>	<i>293</i>
6.3.5	<i>EXPERIMENTO DE INSPECCIÓN VIBROTÉRMICA .....</i>	<i>294</i>

## XII

6.3.6	<i>SIMULACIÓN NUMÉRICA</i> .....	296
6.3.7	<i>RESULTADOS EXPERIMENTALES</i> .....	297
6.3.8	<i>RESULTADOS NUMÉRICOS</i> .....	301
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>305</b>
7.1.1	<i>APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA</i> .....	305
7.1.2	<i>INSPECCIÓN DEL ALTERNADOR</i> .....	306
7.1.3	<i>INSPECCIÓN DE INSTALACIONES DE DE BAJA TENSIÓN</i> .....	308
7.1.4	<i>INSPECCIÓN DE INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA</i> .....	309
7.1.4.1	<i>PROCEDIMIENTOS Y CONDICIONES DE MEDICIÓN</i> .....	309
7.1.4.2	<i>SUGERENCIAS PARA EL MANTENIMIENTO Y MEJORA DEL RENDIMIENTO DE LOS PANELES</i> .....	310
7.1.5	<i>APLICACIONES DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA PARA EL ESTUDIO DE FLUIDOS</i> .....	311
7.1.6	<i>DETECCIÓN DE LA MORFOLOGÍA DE ELÉCTRODOS FLEXIBLES CONFORMADOS A PARTIR DE FABRICACIÓN ADITIVA</i> .....	313
7.1.7	<i>INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA SOBRE LA DETECCIÓN DE GRIETAS POR FATIGA EN PLACA METÁLICA MEDIANTE VIBRO-TERMOGRAFÍA</i> .....	314
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>315</b>

# Índice de figuras

FIGURA 1.1.1: SIR WILLIAM HERSCHEL (1738-1822) [1] .....	25
FIGURA 1.1.2: EXPERIMENTO CON TERMÓMETROS Y COLORES DEL ESPECTRO [1].....	26
FIGURA 1.1.3: MARSILIO LANDRIANI (1746-1815) [1] .....	26
FIGURA 1.1.4: MACEDONIO MELLONI (1798-1854) [2] .....	27
FIGURA 1.1.5: SAMUEL P.LANGLEY (1834-1906) [3] .....	28
FIGURA 1.1.6: DETECTOR DE FOTONES [4] .....	30
FIGURA 2.1.1 ONDAS PERIÓDICAS [24] .....	34
FIGURA 2.1.2 ONDA NO PERIÓDICA [23] .....	34
FIGURA 2.2.1 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO [5].....	38
FIGURA 2.3.1 COMPARACIÓN DE LA DIFUSIÓN DE ENERGÍA EN FORMA DE RADIACIÓN ENTRE UN CUERPO NEGRO Y UN CUERPO REAL. [7].....	45
FIGURA 2.3.2: VARIACIÓN DEL PODER DE EMISIÓN EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA Y DE LA TEMPERATURA. [7] ....	47
FIGURA 2.3.3: PIEZA DE METAL LAMINADO (A) Y COLADA (B) A TEMPERATURAS QUE PROVOCAN UNA EMISIÓN DE RADIACIÓN EN EL ESPECTRO VISIBLE CORRESPONDIENTES AL COLOR BLANCO. [8].....	48
FIGURA 2.3.4 REFLEXIÓN Y ABSORCIÓN DE LA RADIACIÓN VISIBLE EN CUERPOS DIFUSOS Y ESPECULARES. [9] .....	49
FIGURA 2.3.5: EL ÁREA BAJO LA CURVA SOMBRADA EN ROSA REPRESENTA LA ENERGÍA DE RADIACIÓN EMITIDA POR UN CUERPO NEGRO, PARA LA TEMPERATURA DADA, EN EL RANGO DE LONGITUDES DE ONDA $0-\lambda_1$ . [7] .....	50
FIGURA 2.3.6: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA FRACCIÓN DE RADIACIÓN EMITIDA EN LA BANDA DE LONGITUDES DE ONDA DE $\lambda_1$ HASTA $\lambda_2$ . [7] .....	52
FIGURA 2.3.7: INTENSIDAD DE RADIACIÓN (DESCRIBE LA VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE RADIACIÓN RESPECTO DE LA DIRECCIÓN [7].....	53
FIGURA 2.3.8: REBANADA DE SANDÍA DE ÁNGULO SÓLIDO $\omega$ . [7] .....	53
FIGURA 2.3.9: EMISIÓN DE RADIACIÓN DESDE UN ELEMENTO DIFERENCIAL DE SUPERFICIE HACIA EL ESPACIO HEMISFÉRICO CIRCUNDANTE A TRAVÉS DE UN ÁNGULO SÓLIDO DIFERENCIAL. [7] .....	54
FIGURA 2.3.10: PROYECCIÓN DE $dA$ SOBRE UN PLANO NORMAL A $\theta$ . [7] .....	54
FIGURA 2.3.11: RADIACIÓN INCIDENTE SOBRE UNA SUPERFICIE EN LA DIRECCIÓN $(\theta, \phi)$ . [7] .....	56
FIGURA 2.3.12: PODER DE EMISIÓN, IRRADIACIÓN Y RADIOSIDAD. [7] .....	57

FIGURA 2.3.13: LA INTEGRACIÓN DE UNA CANTIDAD "ESPECTRAL" PARA TODAS LAS LONGITUDES DE ONDA DA LA CANTIDAD "TOTAL". [7] .....	58
FIGURA 2.4.2:RANGO, CAMPO Y NIVEL. [1] .....	71
FIGURA 2.4.3: IMAGEN TERMOGRÁFICA CON PUNTOS FIJOS, ÁREAS Y UNA ISOTERMA. [1] .....	72
FIGURA 2.4.4: PERFIL DE TEMPERATURA DE LA IMAGEN INFRARROJA DE UN CONTACTOR TÉRMICO. [11].....	75
FIGURA 2.4.5: FUSIÓN TÉRMICA Y "PICTURE IN PICTURE" DE UN RADIADOR. [12] .....	76
FIGURA 2.4.6 EMISIVIDAD, TRANSMISIÓN Y REFLEXIÓN [13] .....	78
FIGURA 2.4.7: EFECTOS DE UN AJUSTE DE EMISIVIDAD INCORRECTO EN LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA. [14].....	84
FIGURA 2.4.8 ÁNGULO DE VISIÓN DE LA CÁMARA TERMOGRÁFICA. [14] .....	86
FIGURA 2.4.9 ÁNGULO DE VISIÓN DE UN PÍXEL. [14] .....	87
FIGURA 3.3.1: REFLEXIÓN PARA MEDICIONES EXTERIORES. [14] .....	94
FIGURA 3.5.1: REFLEXIÓN ESPECULAR Y DIFUSA. [14] .....	97
FIGURA 3.8.1: HERRAMIENTAS COMUNES DEL TERMÓGRAFO. [1].....	107
FIGURA 3.9.1: IMAGEN INFRARROJA DE LAS VENTANAS DE UNA FACHADA. [1] .....	108
FIGURA 3.10.1: IMAGEN INFRARROJA DE LA ESQUINA CON HUMEDADES DE UNA HABITACIÓN. [1] .....	109
FIGURA 3.10.2:IMAGEN INFRARROJA DE FILTRACIONES DE AIRE. [1].....	109
FIGURA 4.1.1: IMAGEN DIGITAL (A) E INFRARROJA (B) DE UN DEFECTO DE AISLAMIENTO. [15] .....	123
FIGURA 4.1.2: IMAGEN DIGITAL (A) E INFRARROJA (B) DE FUGAS DE AIRE ENTRE TECHO Y VENTANA. [16] .....	123
FIGURA 4.1.3: IMAGEN INFRARROJA DE UNA FILTRACIÓN DE HUMEDAD EN EL SUELO. [16].....	124
FIGURA 4.1.4: PUENTE TÉRMICO EN UNO DE LOS PISOS. [16] .....	125
FIGURA 4.1.5: IMAGEN DIGITAL (A) E INFRARROJA (B) DE DEFECTOS EN SISTEMAS DE CALEFACCIÓN CENTRAL. [16] .....	126
FIGURA 4.1.6: IMAGEN INFRARROJA DE FILTRACIONES EN UN TEJADO PLANO. [16].....	126
FIGURA 4.1.7: IMAGEN DIGITAL (A) E INFRARROJA (B) DE UN SUELO RADIANTE. [17].....	127
FIGURA 4.1.8: IMAGEN DIGITAL (A) E INFRARROJA (B) DE UNA TUBERÍA CON PROBLEMAS. [16].....	129
FIGURA 4.3.1: ESQUEMA DE LOS COMPONENTES DE UNA TURBINA EÓLICA. [16].....	147
FIGURA 4.5.1: IMAGEN INFRARROJA DE UN ASIENTO CALEFACTADO. [19] .....	151
FIGURA 4.6.1: CORTE LÁSER. [19] .....	154
FIGURA 4.6.2: SOLDADURA LÁSER. [19] .....	156
FIGURA 4.7.1: MISIL GUIADO POR LÁSER "NIMROD SR" FABRICADO POR ISRAEL AEROSPACE INDUSTRIES. [20] .....	160

FIGURA 4.7.2: IMAGEN INFRARROJA DE UNOS PEATONES CRUZANDO LA CALLE CAPTADA POR UN VEHÍCULO AUTÓNOMO [21].....	162
FIGURA 4.8.1: HELICÓPTERO REALIZANDO LABORES DE EXTINCIÓN DE INCENDIOS. [19] .....	163
FIGURA 4.8.2: HELICÓPTERO CON SISTEMA GIMBAL MONTADO EN LA PARTE DELANTERA. [19] .....	164
FIGURA 4.8.3: IMAGEN INFRARROJA DE UN INCENDIO. [19].....	164
FIGURA 4.8.4: IMAGEN TÉRMICA AÉREA. [19] .....	165
FIGURA 4.8.5: IMAGEN INFRARROJA DE UN MAPEO TÉRMICO AÉREO. [19] .....	166
FIGURA 4.10.1: IMAGEN INFRARROJA DE UN REACTOR. [19] .....	168
FIGURA 4.12.1:IMAGEN INFRARROJA DE CALDEROS CON METAL FUNDIDO. [19].....	170
FIGURA 4.13.1: IMAGEN TÉRMICA DE UN MOLDE. [19].....	172
FIGURA 4.17.1: IMAGEN INFRARROJA DEL FILAMENTO DE UNA BOMBILLA SITUADO TRAS UN VIDRIO. [19].....	176
FIGURA 4.21.1: USO DE LA CÁMARA TERMOGRÁFICA EN UN CIRCUITO INTEGRADO. [22] .....	180
FIGURA 5.1.1: PATRULLERO P28 TABARCA DE MANIOBRAS EN CORCUBIÓN [23].....	183
FIGURA 5.1.2: IMAGEN DIGITAL (A) E INFRARROJA (B), DESDE UNA PERSPECTIVA FRONTAL Y CERCANA, DEL ESTÁTOR DE UN ALTERNADOR USADO EN EL PATRULLERO TABARCA. [25] .....	186
FIGURA 5.1.3: IMAGEN DIGITAL (A) E INFRARROJA (B), DESDE UNA PERSPECTIVA FRONTAL, DEL ESTÁTOR DE UN ALTERNADOR USADO EN EL PATRULLERO TABARCA. [25] .....	187
FIGURA 5.2.1: IMAGEN DIGITAL (A) E (B) INFRARROJA DE UN CUADRO ELÉCTRICO DE BAJA TENSIÓN CON UN DEFECTO DE NIVEL DE GRAVEDAD “CRÍTICO”. [25] .....	194
FIGURA 5.2.2: IMAGEN DIGITAL (A) E INFRARROJA (B) DE UN CUADRO ELÉCTRICO DE BAJA TENSIÓN CON UN DEFECTO DE NIVEL DE GRAVEDAD “ALTO”. [25] .....	196
FIGURA 5.2.3: IMAGEN DIGITAL (A) E INFRARROJA (B) DE UN CUADRO ELÉCTRICO DE BAJA TENSIÓN CON UN DEFECTO DE NIVEL DE GRAVEDAD “MEDIO”. [25] .....	198
FIGURA 5.2.4: IMAGEN DIGITAL E INFRARROJA DE UN CUADRO ELÉCTRICO DE BAJA TENSIÓN CON UN DEFECTO DE NIVEL DE GRAVEDAD “BAJO”. [25] .....	200
FIGURA 5.3.1: DEPENDENCIA DE ÁNGULO DE LA EMISIVIDAD DEL VIDRIO. [17] .....	212
FIGURA 5.3.2: ÁNGULO DE VISIÓN RECOMENDADO (VERDE) YA A EVITAR (ROJO) AL REALIZAR INSPECCIONES TERMOGRÁFICAS. [17].....	212
FIGURA 5.3.3: CÉLULA DEFECTUOSA. [26].....	217
FIGURA 5.3.4: TENSIONES DE CADA UNO DE LOS MÓDULOS. [26].....	218

FIGURA 5.3.5: TERMOGRAMAS DEL MISMO MÓDULO FOTOVOLTAICO TOMADAS EN LOS AÑOS 2009 (A) Y 2010 (B). SE APRECIA UN DEFECTO DE TIPO "SOMBRA". [26] .....	221
FIGURA 5.3.6: TERMOGRAMAS DEL MISMO MÓDULO FOTOVOLTAICO TOMADAS EN LOS AÑOS 2009 (A) Y 2010 (B). SE APRECIA UN DEFECTO DE "SOLDADURA". [26].....	222
FIGURA 5.3.7: TERMOGRAMAS DEL MISMO MÓDULO FOTOVOLTAICO TOMADAS EN LOS AÑOS 2009 (A) Y 2010 (B). SE APRECIA UN DEFECTO DE TIPO "FISURA". [26] .....	222
FIGURA 6.1.1: IMÁGENES INFRARROJAS DE (A) NÚCLEO DE IGNICIÓN, (B) LLAMA DE HIDROGENO INESTABLE, (C) PENACHO DE ESCAPE SUBSÓNICO Y (D) LLAMA DE DIFUSIÓN DE ETILENO. [27] .....	226
FIGURA 6.1.2: FUNDAMENTOS DEL FUNCIONAMIENTO DEL INTERFERÓMETRO DE MICHELSON.....	232
FIGURA 6.1.3: ESPECTROS DE MUESTRA RECOPIADOS EN TRES ALTURAS DENTRO DE UNA LLAMA DE QUEMADOR HENCKEN. SE MUESTRA EN EL RECUADRO LA RAMA P CORRESPONDIENTE A LAS EMISIONES DE CO. [27] .....	233
FIGURA 6.1.4: EJEMPLO DE DISPOSICIÓN EXPERIMENTAL PARA RECOLECTAR MEDICIONES DE INTENSIDAD DE RADIACIÓN DE FLUJOS DE INTERÉS (PANEL SUPERIOR). EL PANEL INFERIOR MUESTRA UNA RUTA ÓPTICA REPRESENTATIVA A TRAVÉS DE UNA CÁMARA. [27] .....	235
FIGURA 6.1.5: DISTRIBUCIÓN ASUMIDA DE VALORES ESCALARES CUANDO SE APLICA LA TÉCNICA "ONION PEELING". [27] .....	238
FIGURA 6.1.7 CAMPO DE VELOCIDADES INSTANTÁNEO DETERMINADO A PARTIR DE LAS TEMPERATURAS APARENTES MEDIDAS POR TERMOGRAFÍA INFRARROJA. [27] .....	243
FIGURA 6.1.8 CAPTURAS INFRARROJAS DE REMOLINOS EN EL CONDUCTO DE ESCAPE DE UN MOTOR F109. [27] .....	245
FIGURA 6.1.9 FLUCTUACIONES NORMALIZADAS DE LA INTENSIDAD DE RADIACIÓN DE UN CONDUCTO DE ESCAPE. [27] ..	246
FIGURA 6.1.10: DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD NORMALIZADA DE LA RADIACIÓN DE INTENSIDAD EMITIDA POR HOLLÍN (S), CO <sub>2</sub> Y UNA MEZCLA DE CO <sub>2</sub> Y HOLLÍN. [27] .....	247
FIGURA 6.1.11: EMISIONES DE INTENSIDAD DE RADIACIÓN NORMALIZADAS POR UNA LLAMA ESTABILIZADA CON INESTABILIDAD ACÚSTICA. [27] .....	249
FIGURA 6.1.12: INTENSIDAD MEDIA DE LA RADIACIÓN EMITIDA POR EL CO <sub>2</sub> (PANEL SUPERIOR) Y EL CH <sub>4</sub> (PANEL INFERIOR) EN UNA LLAMA TURBULENTO NO PREMEZCLADA (DLR-A). [27].....	252
FIGURA 6.1.13: INTENSIDAD DE RADIACIÓN MEDIA CAPTADAS PARA UNA LONGITUD DE ONDA DE 9.68 MM. [27] .....	253
FIGURA 6.1.14: IMAGEN VISIBLE (A), EMISIONES DE RADIACIÓN PROCEDENTES DEL H <sub>2</sub> O (B), DEL CO <sub>2</sub> (C) Y DEL HOLLÍN Y COMBUSTIBLES (D). [27] .....	254
FIGURA 6.1.15: CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> (MOL/L) EN EL INTERIOR DE BURBUJAS. [27] .....	255
FIGURA 6.1.16: DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA (A), H <sub>2</sub> O (B), CH <sub>4</sub> (C) Y N <sub>2</sub> O (D) DE LOS GASES DE CONTROL. [27]..	256

## XVII

FIGURA 6.1.17: IMÁGENES INFRARROJAS Y ULTRAVIOLETA DE UNA MEZCLA DE AP Y HTPB EN PROCESO DE COMBUSTIÓN. [27].....	257
FIGURA 6.1.18: TEMPERATURAS MÁXIMAS (PANEL SUPERIOR) Y MEDIAS (PANEL INFERIOR) DE UN PENACHO DE ESCAPE PROCEDENTE DE UNA TURBINA ACCIONADA POR UN MOTOR DE DETONACIÓN DE PULSOS (PDE). LOS VALORES FUERON OBTENIDOS EMPLEANDO UNA TÉCNICA DE DECONVOLUCIÓN DE LAS MEDIDAS DE INTENSIDAD DE RADIACIÓN. [27].....	259
FIGURA 6.1.19: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA DE DESCARGA DE PLASMA (SE MUESTRAN LAS BARRAS DE INCERTIDUMBRE). LA TEMPERATURA FUE DETERMINADA A PARTIR DE LOS VALORES MÁXIMOS DE INTENSIDAD DE RADIACIÓN. [27] .....	260
FIGURA 6.1.20: INTENSIDAD DE RADIACIÓN EMITIDA POR TRES FILAMENTOS SITUADOS AGUAS DEBAJO DE UNA LLAMA. [27] .....	261
FIGURA 6.1.21: EMISIONES DE RADIACIÓN PROMEDIADAS EN EL TIEMPO DE UN PENACHO DE ESCAPE TOMADAS MEDIANTE UN IFTS. [27] .....	263
FIGURA 6.1.22: MAGNITUD DE LA CONCENTRACIÓN DE VAPOR DE AGUA DETERMINADA DE FORMA EXPERIMENTAL EN COMPARACIÓN A LA SIMULADA EN UN SOFTWARE. [27] .....	264
FIGURA 6.1.23: TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN DE VAPOR DE UNA LLAMA FORMADA POR UN QUEMADOR "HECKEN". [27].....	265
FIGURA 6.1.24: TEMPERATURA Y DISTRIBUCIÓN DE CO Y CO <sub>2</sub> DEL FLUJO CERCANO A UN OBJETIVO DE GRAFITO IRRADIADO POR LÁSER. [27] .....	266
FIGURA 6.1.25: DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA Y FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DEL HOLLÍN. [27] .....	267
FIGURA 6.1.26: PERFIL DE TEMPERATURAS Y FRACCIÓN MOLAR DE VAPOR DE AGUA DE UNA LLAMA DE H <sub>2</sub> NO ESTACIONARIA. [27] .....	268
FIGURA 6.1.27: DISPOSICIÓN EXPERIMENTAL, INTENSIDAD DE RADIACIÓN CALCULADA E INTENSIDAD DE RADIACIÓN MEDIDA EMITIDA POR UNA LLAMA LAMINAR DE ETILENO ESTABILIZADA EN CUERPO DE FAROL. [27].....	270
FIGURA 6.1.28: INTENSIDAD DE RADIACIÓN MEDIDA (PANELES SUPERIORES) Y CALCULADA (PANELES INFERIORES) INTENSIDAD DE LA RADIACIÓN EMITIDA POR UNA LLAMA TURBULENTO DE DIFUSIÓN FLOTANTE QUE INCIDE SOBRE UNA PLACA PLANA. [27].....	271
FIGURA 6.1.29: VALORES MEDIDOS Y CALCULADOS DE LAS INTENSIDADES DE RADIACIÓN PARA UNA LLAMA DE CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> . [27] .....	272
FIGURA 6.1.30: COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE RADIACIÓN SIMULADAS (PANEL INFERIOR) Y MEDIDAS (PANEL SUPERIOR) DE UN PENACHO DE ESCAPE DE UN COHETE CON TOBERA SUBEXPANDIDA. [27] .....	273

## XVIII

FIGURA 6.1.31: CHISPAS EN PROCESO DE IGNICIÓN DE UNA CÁMARA DE COMBUSTIÓN SCRAMJET. EL PANEL SUPERIOR CORRESPONDE A LA EMISIÓN EN EL INFRARROJO, MIENTRAS QUE EL PANEL INFERIOR CORRESPONDE A MEDICIONES DE QUIMIOLUMINISCENCIA. [27] .....	275
FIGURA 6.1.33: TEMPERATURAS MÁXIMAS APARENTES DURANTE LA COMBUSTIÓN A GRAN ESCALA (~73 M) DE METANO. [27].....	277
FIGURA 6.1.34: EMISIONES DE RADIACIÓN INFRARROJA (ROSA) DEL VAPOR DE COMBUSTIBLE SUPERPUESTAS CON VECTORES DE VELOCIDAD RECOGIDOS MEDIANTE PIV DENTRO DE UN MOTOR. CADA PANEL CORRESPONDE A UN NIVEL DIFERENTE TURBULENCIAS. [27] .....	279
FIGURA 6.1.35: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DE DOS GOTAS DE COMBUSTIBLE DURANTE LA COMBUSTIÓN ( $\epsilon = 1$ ). [27].....	281
FIGURA 6.2.1: PROCESO DE DETECCIÓN DE DEFECTOS DE ELECTRODOS FLEXIBLES POR MEDIO DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA. [28] .....	285
FIGURA 6.2.2: ANÁLISIS DE DETECCIÓN DE DEFECTOS CARACTERÍSTICOS DE ELECTRODOS FLEXIBLES IMPRESOS CON TINTA: (A) DEFECTOS DE DIFERENTES TAMAÑOS EN ELECTRODO FLEXIBLE. (B) MORFOLOGÍA MICROSCÓPICA DE LOS DEFECTOS DEL ELECTRODO FLEXIBLE. (C) IMÁGENES TÉRMICAS INFRARROJAS DE LOS DEFECTOS DEL ELECTRODO FLEXIBLE DURANTE EL PROCESO DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO. (D) RESULTADOS DE LA DETECCIÓN TERMOGRÁFICA POR INFRARROJOS DE LOS DEFECTOS DEL ELECTRODO FLEXIBLE. [28] .....	287
FIGURA 6.2.3: ANÁLISIS TÉRMICO Y AJUSTE DE RESULTADOS DEL RENDIMIENTO DE UN ELECTRODO CON DIFERENTES DEFECTOS. (A), (B) TEMPERATURA Y DIFERENCIA DE TEMPERATURAS ENTRE ÁREAS DEFECTUOSAS Y NO DEFECTUOSAS. (C) ESPECTROSCOPIA DE LA IMPEDANCIA ELECTROMECAÁNICA DE LOS DEFECTOS DE DIFERENTES ELECTRODOS. (D) PREDICCIÓN PARA DIFERENTES IMPEDANCIAS DE ELECTRODOS DEFECTUOSOS. [28].....	289
FIGURA 6.3.1:DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA LEY DE CONTACTO PARA LA SUPERFICIE DE UNA GRIETA. [29] .....	292
FIGURA 6.3.2: (A) PROBETA DE ALUMINIO Y (B) GRIETA DESPUÉS DEL CICLO DE CARGA. [29] .....	294
FIGURA 6.3.4: DISPOSICIÓN EXPERIMENTAL. [29].....	295
FIGURA 6.3.5: MODELO ESQUEMÁTICO TRIDIMENSIONAL DE LA SIMULACIÓN. [29] .....	296
FIGURA 6.3.6: (A) IMAGEN TÉRMICA DE LA PROBETA TRAS LA ESTIMULACIÓN ULTRASÓNICA Y (B) GRÁFICA DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE LOS PUNTOS A Y B. [29].....	298
FIGURA 6.3.7: (A) IMAGEN TÉRMICA CON SUSTRACCIÓN DE FONDO DE LA GRIETA Y (B) RELACIÓN ENTRE LA TEMPERATURA MÁXIMA Y EL TIEMPO DE EXCITACIÓN. [29] .....	299
FIGURA 6.3.8: AMPLITUD Y FASE DE LAS IMÁGENES FFT: (A) IMAGEN DE AMPLITUD Y (B) DE FASE A UNA FRECUENCIA DE 0,1 Hz; (C) IMAGEN DE AMPLITUD Y (D) DE FASE A UNA 0,2 Hz; (E) IMAGEN DE AMPLITUD Y (F) DE FASE A UNA 0,5 Hz. [29].....	300

FIGURA 6.3.9: (A) DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA SUPERFICIE DE LA GRIETA PARA  $t = 10 \text{ ms}$  Y (B) VELOCIDAD DE VIBRACIÓN TANGENCIAL EN LO PUNTOS E, F Y G. [29]..... 301

FIGURA 6.3.10: DESPLAZAMIENTO RELATIVO  $u_1 - u_2 - d$  DEL PAR DE CONTACTO EN EL PUNTO F. [29] ..... 302

FIGURA 6.3.11: ESFUERZOS NORMALES (A) EN EL PUNTO E Y (B) EN LOS PUNTOS F Y G. [29] ..... 302

FIGURA 6.3.12: VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE EXCITACIÓN EN EL PUNTO DE MÁXIMA TEMPERATURA. [29] ..... 303

FIGURA 6.3.13: EFECTOS DEL (A) COEFICIENTE DE FRICCIÓN DINÁMICA Y (B) ANCHURA DE LA GRIETA A TEMPERATURA MÁXIMA. [29] ..... 304

---

# Índice de tablas

---

TABLA 2.2.1: CARACTERÍSTICAS DE CADA FRANJA DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO [6].....	42
TABLA 2.2.2 SUBTIPOS DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA. [6].....	43
TABLA 2.3.1: FUNCIONES $f\lambda$ DE RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO. [7].....	51
TABLA 2.4.1: RESPUESTA ESPECTRAL DE LAS CÁMARAS TERMOGRÁFICAS. [6] .....	60
TABLA 4.7.1: COMPARATIVA ENTRE LA TÉCNICA DE RAYOS X Y LA TÉCNICA TERMOGRÁFICA. [20] .....	158
TABLA 5.1.1: CARACTERÍSTICAS PARTRULLERO TABARCA (P-28). [24] .....	184
TABLA 5.1.2: CUADRO DE DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS DE LA ZONA "E1". [25] .....	187
TABLA 5.1.3: CUADRO DE DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS DE LA ZONA "E1". [25] .....	187
TABLA 5.2.1: INFORMACIÓN SOBRE LA EVALUACIÓN TERMOGRÁFICA N°1. [25] .....	194
TABLA 5.2.2: NIVEL DE GRAVEDAD DEL DEFECTO DETECTADO EN LA EVALUACIÓN TERMOGRÁFICA N°1. [25].....	195
TABLA 5.2.3: POSIBLES CAUSAS DEL DEFECTO DE LA EVALUACIÓN N°1 Y ACCIONES CORRECTIVAS. [25].....	195
TABLA 5.2.4: INFORMACIÓN SOBRE LA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA N°2. [25].....	196
TABLA 5.2.5: NIVEL DE GRAVEDAD DEL DEFECTO DETECTADO EN LA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA N°2. [25].....	197
TABLA 5.2.6: POSIBLES CAUSAS DEL DEFECTO DE LA EVALUACIÓN N°2 Y ACCIONES CORRECTIVAS. [25].....	197
TABLA 5.2.7: INFORMACIÓN SOBRE LA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA N°3. [25].....	198
TABLA 5.2.8: NIVEL DE GRAVEDAD DEL DEFECTO DE LA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA N°3. [25] .....	199
TABLA 5.2.9: POSIBLES CAUSAS DEL DEFECTO DE LA EVALUACIÓN N°3 Y ACCIONES CORRECTIVAS. [25].....	199
TABLA 5.2.10: INFORMACIÓN SOBRE LA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA N°4. [25] .....	200
TABLA 5.2.11: NIVEL DE GRAVEDAD DEL DEL DEFECTO DE LA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA N°4. [25].....	201
TABLA 5.2.12: POSIBLES CAUSAS DEL DEFECTO DE LA EVALUACIÓN N°4 Y ACCIONES CORRECTIVAS. [25].....	201
TABLA 5.3.1: STANDARD TEST CONDITIONS (STC). [26] .....	215
TABLA 5.3.2: NOMINAL OPERATION CELL TEMPERATURE (NOCT). [26] .....	216
TABLA 5.3.3: CARACTERÍSTICAS DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS. [26].....	216
TABLA 5.3.4: VALORES PROMEDIO DEL RENDIMIENTO DE LOS 3 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS. [26] .....	218
TABLA 5.3.5: EJEMPLO DE DEFECTOS TÍPICOS DETECTABLES EN PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS. [26] .....	220

TABLA 6.1.1: COMPARACIÓN ENTRE ESCALA DE LONGITUD DE REMOLINOS TURBULENTOS MEDIANTE EL USO DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA Y PIV. [27] .....	250
TABLA 6.1.2: COMPARACIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES MEDIDAS Y CALCULADAS DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA BASADA EN CARBÓN. [27] .....	262
TABLA 6.2.1: PARÁMETROS BÁSICOS Y PRESTACIONES DEL GENERADOR DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS. [28] .....	286
TABLA 6.3.1: PROPIEDADES DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO MODELADA. [29] .....	296
TABLA 6.3.1: POSIBLES CAUSAS DE UN MALFUNCIONAMIENTO DE UN ALTERNADOR Y MEDIDAS CORRECTORAS. [30] .....	307

---

# Glosario de términos

---

$A$  → Área. Unidades:  $[\text{m}^2]$ .

$C_1$  → Constante que aparece en la ecuación para calcular el poder de emisión espectral de un cuerpo negro a una longitud de onda  $\lambda$  y temperatura  $T$ . Su valor es  $2\pi^5hc_0^2/15 = 3,74177 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$ .

$C_2$  → Constante que aparece en la ecuación para calcular el poder de emisión espectral de un cuerpo negro a una longitud de onda  $\lambda$  y temperatura  $T$ . Su valor es  $hc_0/k = 1,43878 \times 10^8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ .

$E$  → Flujo total de radiación, calculado mediante la integral de  $E_\lambda$  a lo largo del espectro de longitudes de onda. Unidades:  $[\text{W}/\text{m}^2]$ .

$E_b$  → Poder de emisión total de un cuerpo negro a una temperatura  $T$ . Unidades:  $[\text{W}/\text{m}^2]$ .

$E_{b\lambda}$  → Poder de emisión espectral de un cuerpo negro a una longitud de onda  $\lambda$  y temperatura  $T$ . Unidades:  $[\text{W}/\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m}]$ .

$E_{b,0-\lambda}$  → Poder de emisión espectral de un cuerpo negro por unidad de área sobre una banda de longitudes de onda, desde  $\lambda = 0$  hasta  $\lambda$ . Unidades:  $[\text{W}/\text{m}^2]$ .

$E_\lambda$  → Poder de emisión espectral de un cuerpo negro a una longitud de onda  $\lambda$ . Unidades:  $[\text{W}/\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m}]$ .

$f_\lambda$  → Función de radiación de cuerpo negro. Es la cantidad adimensional que mide la cantidad de energía de radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura absoluta  $T$ , por unidad de tiempo, por unidad de área superficial y por unidad de longitud de onda en torno a una longitud de onda específica. Unidades: [adimensional].

$f_{\lambda_1-\lambda_2}$  → Función de radiación de cuerpo negro para la banda de  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$ . Es la cantidad adimensional que mide la cantidad de energía radiante emitida por el cuerpo negro dentro de la banda de longitudes de onda acotada. Unidades: [adimensional].

$G$  → Irradiación total, calculada mediante la integral de  $G_\lambda$  a lo largo del espectro de longitudes de onda. Unidades:  $[\text{W}/\text{m}^2]$ .

$G_\lambda$  → Irradiación espectral, que representa la cantidad de radiación comprendida entre una franja del espectro electromagnético que emite un cuerpo. Unidades:  $[\text{W}/\text{m}^2]$ .

$h \rightarrow$  Constante de Planck =  $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

$I_{b\lambda} \rightarrow$  Intensidad espectral a una longitud de onda  $\lambda$  emitida por un cuerpo negro a una temperatura  $T$ .  
Unidades:  $[\text{W}/\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m}]$ .

$I_e \rightarrow$  Intensidad total de radiación emitida, calculada mediante la integral de  $I_{\lambda,e}$  a lo largo del espectro de longitudes de onda. Unidades:  $[\text{W}/\text{m}^2]$ .

$I_{e+r} \rightarrow$  Suma de las intensidades espectrales emitida y reflejada, para una superficie que emite y refleja difusamente. Unidades:  $[\text{W}/\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m}]$ .

$I_{\lambda,e} \rightarrow$  Intensidad espectral para la radiación emitida, que representa la razón a la cual la energía de radiación  $d\dot{Q}_i$  es emitida a la longitud de onda  $\lambda$  en la dirección  $(\theta, \phi)$  por unidad de área normal a esta dirección, por unidad de ángulo sólido en torno a esta última. Unidades:  $[\text{W}/\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m}]$ .

$I_{\lambda,e} \rightarrow$  Suma de las intensidades espectrales emitida y reflejada, para una superficie que emite y refleja difusamente. Unidades:  $[\text{W}/\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m}]$ .

$I_{\lambda,i} \rightarrow$  Intensidad espectral para la radiación incidente, que representa la razón a la cual la energía de radiación  $d\dot{Q}_i$  incide desde la dirección  $(\theta, \phi)$  por unidad de área de la superficie receptora normal a esta dirección y por unidad de ángulo sólido alrededor de esta última. Unidades:  $[\text{W}/\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m}]$ .

$I_i \rightarrow$  Intensidad total de radiación incidente, calculada mediante la integral de  $I_{\lambda,i}$  a lo largo del espectro de longitudes de onda. Unidades:  $[\text{W}/\text{m}^2]$ .

$J \rightarrow$  Radiosidad total, calculada mediante la integral de  $J_\lambda$  a lo largo del espectro de longitudes de onda. Unidades:  $[\text{W}/\text{m}^2]$ .

$J_\lambda \rightarrow$  Radiosidad espectral, que representa la cantidad que representa la razón a la cual la energía de radiación sale de una unidad de área de una superficie en todas direcciones. Unidades:  $[\text{W}/\text{m}^2]$ .

$\lambda \rightarrow$  Longitud de onda. Unidades:  $[\mu\text{m}]$ .

$(\lambda T)_{\text{poder máx}} \rightarrow$  Longitud de onda para la cual se emite la máxima cantidad de radiación para una determinada temperatura  $T$ .

$\dot{Q}_e \rightarrow$  Flujo de radiación emitida por un cuerpo. Unidades:  $[\text{W}]$ .

$T \rightarrow$  Temperatura absoluta de la superficie. Unidades:  $[\text{K}]$ .

$\theta \rightarrow$  Ángulo polar. Unidades:  $[\text{adimensional}]$ .

$\phi \rightarrow$  Ángulo azimutal. Unidades: [adimensional].

$\sigma \rightarrow$  Constante de Stefan-Boltzmann =  $5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

$k \rightarrow$  Constante de Boltzmann =  $1,38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ .

---

# 1 Introducción

---

## 1.1 CONTEXTO HISTÓRICO

Antes del siglo XIX ni si quiera se había sospechaba sobre la existencia de la región infrarroja del espectro electromagnético. Su descubridor fue Sir William Herschel, astrónomo real del rey Jorge III de Inglaterra, el cual estaba realizando una investigación con la finalidad de encontrar un material para filtros ópticos de telescopios que consiguiese reducir el brillo durante las observaciones realizadas en presencia del sol. Conforme probaba cristales con diferentes tonalidades de color se percató de que algunos dejaban pasar muy poco calor solar, mientras que otros dejaban pasar tanto calor que podían producir daños oculares en los observadores a los pocos segundos.

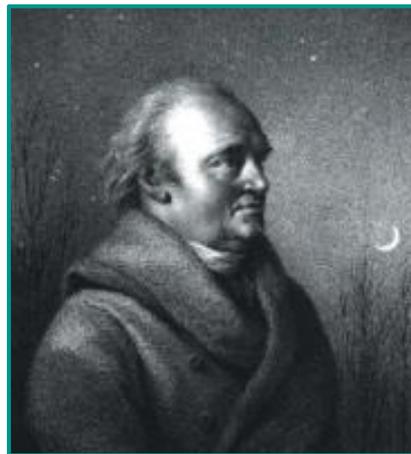


Figura 1.1.1: Sir William Herschel (1738-1822) [1]

Tras este suceso, Herschel planteó un experimente sistemático para poder hallar un cristal que además de conseguir una reducción del brillo solar redujese al mínimo la cantidad de calor transmitido para evitar daños oculares. Comenzó su experimento replicando el de los prismas de Newton, con la diferencia de que en esta ocasión el foco del experimento estaba puesto en el efecto calorífico en lugar de en la distribución visual de la intensidad del espectro. Inicialmente oscureció el bulbo de un termómetro de mercurio con tinta para usarlo como detector de radiación y con el probó el efecto calorífico de los colores del espectro que se formaban sobre la superficie de la mesa tras hacer pasar la luz solar a través de un prisma cristalino. Adicionalmente, empleó termómetros adicionales situados fuera del alcance de la radiación solar como método de control.

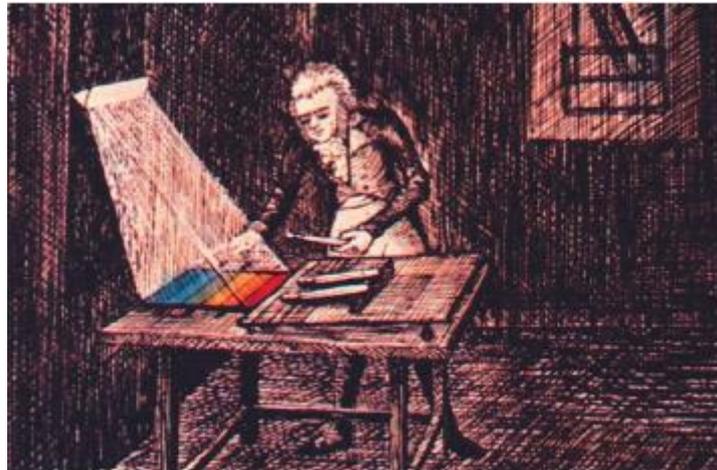


Figura 1.1.2: Experimento con termómetros y colores del espectro [1]

Herschel observó que conforme desplazaba el termómetro oscurecido a través de los colores del espectro se producía un incremento fijo de temperaturas entre colores consecutivos, desde el extremo violeta hasta el extremo rojo. Esto ya había sido observado por Marsilio Landriani en 1777 con un experimento similar. Sin embargo, novedad que Herschel introdujo con este experimento fue la suposición que realizó sobre la existencia de un punto en el cual el efecto calorífico fuera el máximo y que ese punto se encontraba fuera de las medidas tomadas en la parte visible del espectro. Al mover el termómetro hacia la región oscura, más allá del límite del extremo rojo, Herschel apreció que la cantidad de calor que el termómetro absorbía seguía aumentando. Siguió desplazando el termómetro en la misma dirección hasta detectar el punto en el que la temperatura era máxima, punto el cual estaba situado en lo que hoy se conocen como longitudes de onda infrarrojas.



Figura 1.1.3: Marsilio Landriani (1746-1815) [1]

Herschel bautizó esta nueva región del espectro electromagnético como “espectro termométrico”, haciendo referencia en numerosas ocasiones a la radiación como “calor oscuro” o “rayos” invisibles. El término infrarrojo fue adoptado en unos documentos anónimos 75 años después del descubrimiento de Herschel.

El uso de un cristal en los prismas del experimento original de Herschel generó inicialmente controversia entre sus contemporáneos acerca de las longitudes de onda infrarrojas. Para tratar de determinar la validez del trabajo de Herschel, diferentes investigadores replicaron el experimento empleando una gran variedad de cristales, obteniendo así distintos grados de transparencia para la radiación infrarroja. El propio Herschel también realizó pruebas con diferentes cristales en sus prismas y anotó como la transparencia frente a la radiación cambiaba con las diferentes clases de cristal, concluyendo que las lentes que debían ser utilizadas en los telescopios debían ser forzosamente elementos reflectantes (espejos curvos y lisos). En 1830 se refutó esta última hipótesis de Herschel cuando el investigador italiano Melloni realizó su gran descubrimiento: la sal de roca (NaCl) disponible en los cristales naturales suficientemente grandes para la elaboración de lentes y prismas era muy transparente al paso de rayos infrarrojos. A causa de esto, durante los 100 próximos años la sal de roca sería el único material óptico empleado para aplicaciones relacionadas con los infrarrojos hasta la llegada del dominio del arte de la creación de cristales sintéticos en los años 30.



Figura 1.1.4: Macedonio Melloni (1798-1854) [2]

Hasta la invención del termopar en 1829 por parte de Nobili, los termómetros eran los únicos dispositivos empleados para medir la radiación. Los termómetros más precisos tenían una precisión de 0,05 °C y los convencionales, como el usado en el experimento de Herschel, de unas 0,2 °C. La llegada del termopar dio origen a la primera termopila, la cual consistía en varios termopares conectados en serie e incrementaba la sensibilidad calorífica en unas cuarenta veces en comparación a los termómetros más precisos de la época (su precisión era tal que captaba el calor de una persona a una distancia de 3 metros).

En 1840, como resultado de Sir John Herschel, se capturó la primera “imagen de calor” basándose en la diferencia de evaporación al exponer una fina capa de aceite a distintos patrones de calor enfocadas hacia esta. La imagen térmica era visible gracias a la luz reflejada en los lugares en los que los efectos de interferencia de la capa de aceite hacían que la capa fuera visible para el ojo humano. Asimismo, Sir John Herschel registro la imagen térmica de forma primitiva en un papel y la denominó “termografía”.

En 1880 Langley inventa el bolómetro a partir de una delgada tira de platino oscurecido conectada a uno de los brazos de un puente de Wheatstone sobre la cual era enfocada la radiación infrarroja y a la que respondía un galvanómetro sensible. Teóricamente, el instrumento era capaz de detectar la radiación en forma de calor de una vaca a una distancia de hasta 400 metros.

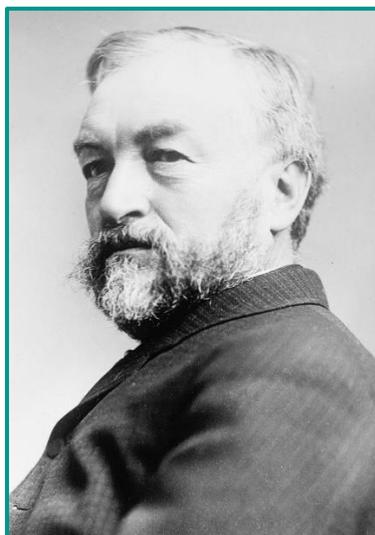


Figura 1.1.5: Samuel P.Langley (1834-1906) [3]

Sir James Dewar fue pionero en el uso de gases líquidos como agentes enfriadores en investigaciones a bajas temperaturas. Este científico inglés inventó en 1892 lo que sería la base de los presentes

“termos” que en la actualidad se utilizan para conservar bebidas frías o calientes, un contenedor de vacío que posibilitaba el almacenamiento de gases en estado líquido durante varios días.

Entre los años 1900 y 1920 se crearon innumerables patentes de dispositivos para la detección de barcos, aviones, artillería, icebergs. Los primeros sistemas que funcionaba aproximadamente como los modernos comenzaron a desarrollarse durante la contienda que tuvo lugar entre los años 1914 y 1918, momento en el que ambos bandos tenían programas de investigación dedicadas a aplicaciones militares de la radiación infrarroja. Estos sistemas incluían:

- Sistemas para la detección de intrusiones del enemigo.
- Sensores de temperatura remotos.
- Comunicaciones seguras.
- “Torpedos aéreos” guiados

Los sistemas de búsqueda por infrarrojos probados durante esta época tenían una precisión tal que eran capaces de detectar un avión aproximándose a una distancia de 1,5 km y una persona a una distancia de más de 300 metros.

Los sistemas más sensibles hasta la fecha estaban basados en variaciones del bolómetro, pero el periodo de entreguerras fue el caldo de cultivo del desarrollo de innovadores detectores de infrarrojos, en especial el conversor de imágenes y el detector de fotones. Inicialmente el sistema que más interés suscitó entre los militares fue el conversor de imágenes, pues permitía literalmente que un observador viese en la oscuridad. A pesar de ello, la sensibilidad del conversor de imágenes estaba confinada a las longitudes de onda infrarrojas más cercanas al espectro visible, lo que ocasionaba que los objetivos militares más interesantes tuviesen que ser iluminados por haces de búsqueda infrarrojos. El interés militar en el conversor de imágenes fue diluyéndose con el tiempo ya que emitir un haz infrarrojo de búsqueda podía delatar la posición del observador a un observador en enemigo que emplease una tecnología de detección similar



Figura 1.1.6: Detector de fotones [4]

El desarrollo de sistemas térmicos de imagen “pasivos” (sin haz de búsqueda) recibió cierto impulso después de la guerra de Segunda Guerra Mundial formando parte de una serie de programas de investigación de alto secreto. Durante este periodo, las normativas sobre los secretos militares evitaban que se revelase el estado de la tecnología de imágenes infrarrojas. No sería hasta la década de 1950 cuando la ciencia y la industria civil comenzarían a tener a su disposición dispositivos de imágenes térmicas adecuadas para sus necesidades.

## 1.2 APROXIMACIÓN A LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA

Desde que se tiene noción del tiempo la humanidad ha intentado medir las variables que de una u otra forma influían en su vida cotidiana. De entre todas ellas, las que más se miden en la actualidad son el tiempo y la temperatura.

Poniendo el foco en la variable que más interés suscita en este trabajo, la temperatura, se puede afirmar que su trascendencia reside en que, en función de la aplicación, variaciones mínimas de unas décimas pueden llegar a ser objeto de un problema o avería en lo referente a la maquinaria o una enfermedad en lo referente a una gran cantidad de seres vivos. Del mismo modo, la temperatura juega un papel importantísimo en la conservación de alimentos y acondicionamiento de habitáculos; en resumen, la temperatura es una variable fundamental que controlada adecuadamente garantiza una serie de ventajas muy importantes.

Aprender la técnica de la termografía resulta útil por motivos como:

- **Multidisciplinaridad:** Las imágenes no solo ofrecen información sobre la temperatura de un cuerpo, sino que su interpretación permite observar patrones térmicos, anomalías, etc.
- **Bidimensionalidad:** La temperatura se puede medir en dos o más puntos del mismo objeto al mismo tiempo. Por tanto, se pueden llegar a componer imágenes térmicas de alta precisión si se emplean numerosos puntos de medición.
- **Medida en tiempo real:** A la vez que se visualiza el objeto en la pantalla de la cámara se pueden obtener las lecturas de la temperatura y cualquier cambio que experimente el objeto será reflejado de forma inmediata en la pantalla de la cámara, sin inercias ni actualizaciones.
- **Naturaleza no invasiva:** Las mediciones se realizan sin contacto directo, evitando peligros, por ejemplo, durante la realización de inspecciones termográficas en líneas eléctricas. Tampoco se altera el estado del objeto durante la medición.

Estos motivos diferenciadores han promovido que la termografía haya extendido su campo de aplicación a áreas tan dispares como:

- Medicina.
- Veterinaria.
- Electricidad.
- Edificación.
- Procesos industriales.
- Sistemas de seguridad y anti-intrusión.
- Navegación.
- Automoción.
- Etc.

Sin embargo, la cámara proporcionará únicamente una pequeña parte de la información, el resto queda a discreción de la persona que interpreta la imagen. El operario que está trabajando con la técnica termográfica debe tener amplios conocimientos en el campo en el que se está trabajando para poder llegar a conclusiones inequívocas y acertadas. En caso contrario, el termógrafo (persona que maneja

la cámara termográfica) será una mera herramienta más, el cual facilitará la imagen térmica a un especialista en el campo en cuestión que interpretará los resultados.

### 1.3 QUE ES LA TERMOGRAFÍA

La termografía infrarroja es una técnica que permite medir temperaturas a distancia y sin contacto físico con el objeto a estudiar. Se basa en la captación de la radiación infrarroja del espectro electromagnético utilizando cámaras termográficas, que convierten la energía radiada en información sobre la temperatura del objetivo.

Las cámaras termográficas son dispositivos que detectan el patrón térmico de los cuerpos a los que se apuntan, operando en el espectro de la longitud de onda infrarroja. Estas cámaras no necesitan entrar en contacto con los objetos y permiten visualizar la información térmica que normalmente es imperceptible a simple vista.

La imagen generada por la cámara termográfica se conoce como termograma, imagen térmica o imagen radiométrica. Un termograma es una imagen térmica que contiene cálculos de las medidas de temperatura en todos los puntos de la imagen.

---

# 2 Fundamentos termográficos

---

## 2.1 FUNDAMENTOS

Se denomina onda a la propagación de energía en el espacio causada por perturbaciones en al menos una de sus propiedades físicas (campo eléctrico, campo magnético, presión, densidad...) sin que se produzca propagación de materia en el espacio como consecuencia de las ya citadas perturbaciones. Este fenómeno puede darse tanto en un espacio que contenga materia como en que no la contenga (espacio vacío).

### 2.1.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS

Atendiendo al movimiento del medio, las ondas pueden ser:

- **Ondas mecánicas:** Requieren de un medio material para propagarse, además de unas condiciones de temperatura y presión concretas. Ejemplos de este tipo de onda son:
  - Ondas de marea
  - Ondas sísmicas
  - Ondas sonoras
- **Ondas electromagnéticas:** Conocidas también como campos electromagnéticos “CEM”, no precisan de medio material alguno para propagarse, por lo que son las únicas que pueden atravesar el vacío. Se caracterizan también por su alta velocidad de desplazamiento y su capacidad de atravesar materiales sin generar ondas mecánicas en el proceso. Se pueden clasificar por bandas de frecuencia conocidas como espectro electromagnético, que engloban desde las ondas de baja frecuencia (líneas eléctricas, radio, televisión...) hasta las ondas más baja frecuencia (radiación gamma, rayos ultravioletas, rayos X).

Atendiendo a su periodicidad, las ondas pueden ser:

- **Ondas periódicas:** La perturbación que crea el tren de ondas se repite en ciclos repetitivos, es decir, si se toma un instante cualquiera “t”, al cabo de una determinada cantidad de tiempo (periodo) se observaría de nuevo el mismo tren de ondas.

- **Ondas no periódicas:** La perturbación que produce el tren de ondas no es de naturaleza cíclica, con lo cual cada onda tiene características distintas.

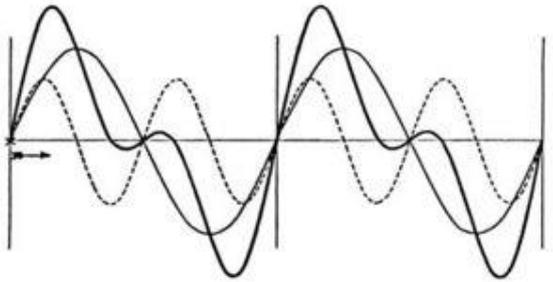


Figura 2.1.1 Ondas periódicas [24]

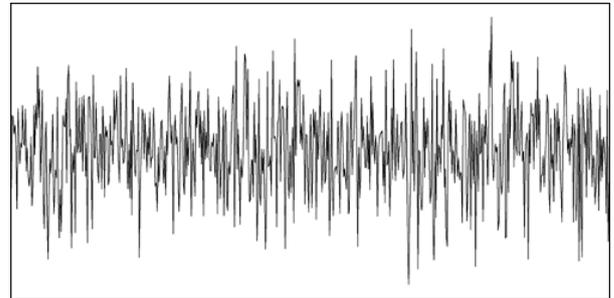


Figura 2.1.2 Onda no periódica [23]

Atendiendo las dimensiones en las que se transmitan, las ondas pueden ser:

- **Unidimensionales:** Se desplazan espacialmente en una única dirección.
- **Bidimensionales:** Alternativamente conocidas como ondas superficiales, se desplazan en dos direcciones espaciales perpendiculares entre sí.
- **Tridimensionales:** Alternativamente conocidas como ondas esféricas, se desplazan en las tres direcciones que existen en el espacio.

Atendiendo al movimiento del medio, las ondas pueden ser:

- **Transversales:** Las partículas vibran en dirección perpendicular al desplazamiento de la onda.
- **Longitudinales:** Las partículas vibran en la dirección de desplazamiento de la onda.

Atendiendo al grado de ionización, las ondas pueden ser:

- **Ionizantes:** Se conoce como radiación ionizante y es muy nociva para la salud de las personas, siendo necesario el uso de equipos de protección especializados en entornos en los que estas ondas están presentes. Pertenecen a este grupo las ondas electromagnéticas cuyas frecuencias son muy superiores a las del espectro visible. Estas ondas contienen una cantidad fe energía masiva, teniendo la capacidad incluso de modificar la estructura de la materia que atraviesan.

- **No ionizantes:** Pertenecen a este grupo todas las ondas electromagnéticas de media y baja frecuencia, así como las ondas mecánicas. No poseen la capacidad de modificar la estructura molecular de la materia

### 2.1.2 ELEMENTOS DE LAS ONDAS

- **Elongación:** Distancia que existe entre un punto correspondiente a la línea de equilibrio y el punto de la onda situado perpendicularmente a dicha línea.
- **Amplitud:** Distancia medida en vertical entre el punto de equilibrio de la onda y una cresta o un valle.
- **Cresta:** Punto de amplitud máxima, esto es, el punto de la onda que se encuentra a una mayor distancia respecto a la posición de reposo.
- **Valle:** Es el punto de amplitud máxima medido en la misma dirección, pero sentido opuesto que la cresta.
- **Periodo ( $T$ ):** Es el tiempo necesario para completar un ciclo (longitud de onda) y está relacionado estrechamente con la frecuencia ( $T = 1/f$ )
- **Frecuencia ( $f$ ):** Es el número de ciclos que completa la onda por unidad de tiempo, convencionalmente el “segundo”.
- **Nodos:** Puntos en los que la onda y la línea de equilibrio se cortan.
- **Ciclo:** Concepto asociado únicamente a ondas periódicas. Cada ciclo está comprendido entre el punto inicial de un periodo de la onda y el punto final de este.
- **Fase:** Siendo una onda una magnitud que varía su valor de forma cíclica, indica la situación del ciclo en cada instante mediante una indicación del tiempo transcurrido en relación con el instante tomado como referencia.
- **Velocidad de propagación ( $v$ ):** Es la tasa distancia-tiempo a la que se mueve la onda y está relacionada con la longitud de onda y el periodo ( $v = \lambda/T$ )

### 2.1.3 FENOMENOS ASOCIADOS A LAS ONDAS

- **Difracción:** La difracción es un fenómeno asociado a las ondas que ocurre cuando una onda encuentra un obstáculo o una apertura en su camino. En lugar de seguir en línea recta, la onda se dobla alrededor del obstáculo o se extiende después de pasar por la apertura. Esto sucede porque las ondas se propagan en todas las direcciones desde su fuente y pueden "doblar" su trayectoria alrededor de objetos. La difracción es comúnmente observada en ondas como las ondas de luz, sonido y agua.
- **Reflexión:** La reflexión es el fenómeno en el cual una onda cambia de dirección al encontrar una superficie que le impide seguir avanzando. Al chocar con la superficie, la onda rebota y regresa en la dirección opuesta. Un ejemplo común de reflexión es el eco que se produce cuando las ondas sonoras rebotan en una pared u otra superficie sólida.
- **Refracción:** La refracción es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio a otro con diferente velocidad de propagación. Esto sucede porque la velocidad de propagación de una onda depende del medio en el que se encuentra. Cuando la onda atraviesa una interfaz entre dos medios distintos, como aire y agua, se dobla hacia o lejos de la normal a la superficie, dependiendo de si la velocidad aumenta o disminuye al pasar al nuevo medio.
- **Interferencia:** La interferencia es el fenómeno que ocurre cuando dos o más ondas se superponen en un punto espacial. Cuando las crestas de dos ondas coinciden en el mismo punto, se produce una interferencia constructiva, lo que resulta en una amplitud mayor. Por el contrario, cuando una cresta coincide con un valle de otra onda, se produce una interferencia destructiva, lo que resulta en una amplitud menor. La interferencia puede ser observada en diversas ondas como las ondas de luz, sonido y agua.
- **Onda de choque:** Una onda de choque es una onda generada cuando la velocidad de propagación de una onda supera la velocidad del sonido en el medio en el que se propaga. Esto ocurre cuando varias ondas con diferentes velocidades se superponen, formando un frente con forma cónica. Las ondas de choque son comunes en la aerodinámica y en fenómenos como el estampido sónico producido por aviones supersónicos.
- **Efecto Doppler:** El efecto Doppler es el cambio aparente en la frecuencia de una onda cuando la fuente emisora de las ondas se mueve con respecto al receptor de estas. Si la fuente se acerca

al receptor, las ondas parecen tener una frecuencia más alta (tono más agudo), mientras que si la fuente se aleja, las ondas parecen tener una frecuencia más baja (tono más grave). Este efecto es comúnmente observado en el sonido de una ambulancia o un automóvil que se acerca o se aleja. Además de aplicarse al sonido, el efecto Doppler también es relevante para otras ondas, como las ondas de luz, y se utiliza en diversas aplicaciones científicas y tecnológicas.

- **Polarización:** La polarización es una propiedad de ciertas ondas, como las ondas electromagnéticas (luz), que indica la dirección de la oscilación del campo eléctrico en la onda. En las ondas polarizadas, el campo eléctrico oscila en una sola dirección, mientras que en las ondas no polarizadas, el campo eléctrico oscila en todas las direcciones posibles. La polarización es importante en diversas aplicaciones de la tecnología, como en la transmisión y recepción de señales de comunicación.
- **Fase y fase relativa:** La fase de una onda se refiere a la posición de una partícula o punto en la onda en un momento específico. En una onda periódica, la fase se repite a intervalos regulares y está relacionada con el tiempo transcurrido desde un punto de referencia en la onda. La fase relativa se refiere a la diferencia en fase entre dos o más ondas que se superponen en un punto espacial. La interferencia de las ondas depende de su fase relativa.
- **Onda estacionaria:** Una onda estacionaria es el resultado de la superposición de dos ondas de la misma frecuencia y amplitud que se mueven en direcciones opuestas. Esto da lugar a puntos donde la amplitud no cambia con el tiempo y se denominan nodos, y puntos donde la amplitud oscila entre un máximo y un mínimo, denominados vientres. Las ondas estacionarias son comunes en instrumentos musicales, como cuerdas de guitarra y tubos resonantes.
- **Ondas armónicas:** Las ondas armónicas son ondas que siguen una relación simple entre su frecuencia y longitud de onda. En una onda armónica, cada ciclo de la onda es idéntico y se repite periódicamente en el tiempo. Las ondas sonoras producidas por instrumentos musicales, como cuerdas o tubos de viento, son ejemplos de ondas armónicas.

## 2.2 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos variables que se propagan a través del espacio y transportan energía a través de este. Las ondas electromagnéticas que se desplazan a la velocidad de la luz constituyen la propia radiación electromagnética.

Su generación puede deberse a múltiples fuentes:

- Dipolos oscilantes
- Cargas aceleradas
- Corrientes variables

Su comportamiento queda completamente descrito por el modelo de ecuaciones matemáticas de Maxwell.

### 2.2.1 ESPECTRO VISIBLE

Se produce en la corteza de los átomos cuando estos reciben energía para que sus electrones se desplacen a capas electrónicas más energéticas. En estas capas de mayor nivel energético los electrones son inestables en el caso de la existencia de niveles energéticos menores desocupados, por lo que espontáneamente tienden a ocupar estos últimos en busca de una mayor estabilidad atómica. Según el principio de conservación de energía, la transición de estos electrones a estratos de menor energía requiere de una emisión energética en forma de fotones, los cuales son ondas cuya frecuencia se encuentra en el rango visible del ojo humano. Esta frecuencia determina el color que percibe el ojo humano

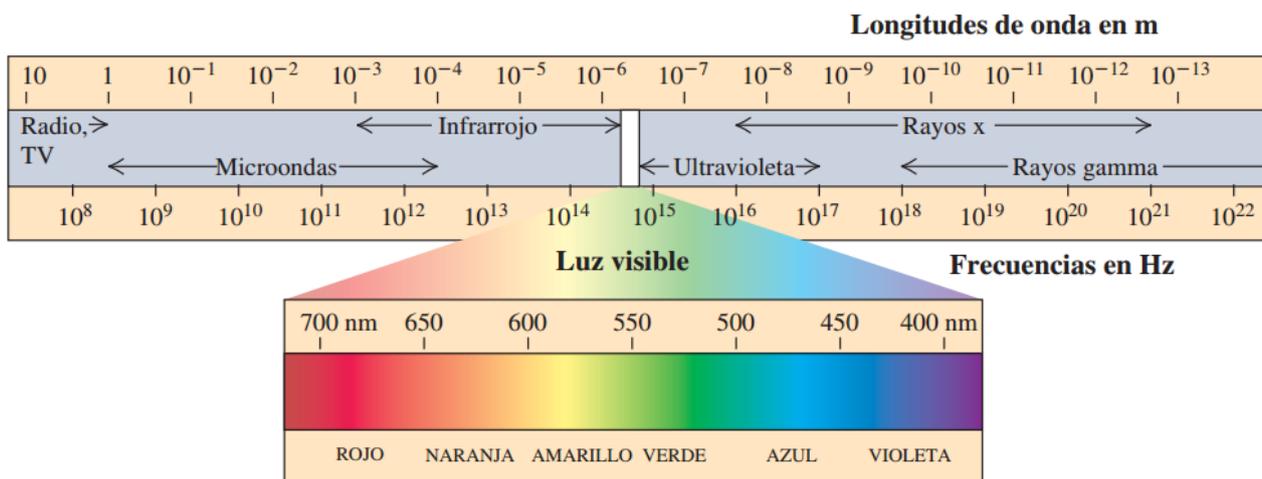


Figura 2.2.1 Espectro electromagnético [5]

El espectro visible es la parte del espectro electromagnético que es visible para el ojo humano. Se compone de las diferentes longitudes de onda de luz que van desde aproximadamente 400 nanómetros

(nm) a 700 nanómetros (nm). El espectro visible se percibe como colores que van desde el violeta en la región de menor longitud de onda, hasta el rojo en la región de mayor longitud de onda. Los colores del espectro visible, en orden creciente de longitud de onda, son violeta, azul, cian, verde, amarillo, naranja y rojo.

La luz blanca es una mezcla de todas las longitudes de onda del espectro visible en proporciones adecuadas. Cuando la luz blanca atraviesa un prisma o se refleja en una superficie con diferentes ángulos, se dispersa y se separa en los distintos colores del espectro, creando el fenómeno conocido como "espectro de colores".

Existen dos tipos de objetos visibles:

- Cuerpos que emiten luz por sí mismos
- Cuerpos que reflejan la luz

El color de estos es dependiente del espectro de la luz incidente y de la absorción del objeto, la cual determina que ondas fracción de las ondas son reflejadas. El ojo humano es sensible a un pequeño intervalo del espectro electromagnético debido a que:

- Las ondas que tienen una menor frecuencia que la luz (ondas de radiofrecuencia) bordean los objetos sin llegar a interactuar con estos. Es por ello que los móviles tienen cobertura incluso encontrándose en el interior de una vivienda.
- Las ondas que tienen una frecuencia superior a la de la luz atraviesan la materia. Por ejemplo, los Rayos X atraviesan la carne, pero no los huesos, mientras que los rayos gamma son capaces de atravesar cualquier parte del cuerpo humano.

Solo en la pequeña franja del espectro electromagnético denotada como “espectro visible” las ondas electromagnéticas interactúan con la materia mediante los fenómenos de reflexión o absorción, permitiendo a las personas ver los objetos, sus formas, su posición... y también determinar qué conjunto de frecuencias emite el objeto (color).

Un estímulo de luz elemental es una mezcla arbitraria de luces puras dentro del espectro. Esta puede estar compuesta de un número infinito de rayos (espectro discreto) o por una mezcla continua de longitudes de onda. Matemáticamente, el espacio de posibles espectros tiene una dimensión infinita. Físicamente, la luz puede ser descompuesta en sus componentes elementales, cuyas intensidades pueden ser medidas por un espectrómetro.

Una fuente de luz (un espectro) se dice que es monocromático cuando este consiste en radiación de una sola longitud de onda: Esto es que el espectro más discreto posible. Sin embargo, una luz monocromática no es una mezcla porque no se puede obtener como una mezcla de luces monocromáticas.

El espectro visible es fundamental para la visión humana y juega un papel crucial en nuestra percepción del mundo que nos rodea. La luz que incide en los objetos interactúa con ellos de diferentes maneras: puede ser absorbida, reflejada o transmitida. La combinación de estas interacciones determina qué colores vemos en los objetos.

La sensibilidad del ojo humano a diferentes colores varía, y esto está relacionado con la composición de los conos en la retina del ojo, que son células responsables de detectar el color. Los humanos poseen tres tipos de conos, sensibles a diferentes longitudes de onda, lo que nos permite percibir colores en un amplio rango del espectro visible.

Además de ser esencial para la visión, el espectro visible también tiene importantes aplicaciones en diversos campos científicos y tecnológicos. En fotografía, televisión y pantallas de dispositivos electrónicos, el espectro visible es utilizado para reproducir imágenes y videos. En espectroscopía, se utiliza para analizar la composición de materiales y determinar la presencia de elementos químicos en sustancias. También es crucial en campos como la óptica, la iluminación, la biología, la física y la astronomía.

## 2.2.2 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Se denomina espectro electromagnético al conjunto de ondas electromagnéticas, o radiación electromagnética que emite (espectro de emisión), o absorbe (espectro de absorción) un objeto. Dicha radiación sirve para identificar al objeto. Los espectros se pueden observar mediante espectroscopios que, además de permitirnos observar el espectro, permite realizar medidas sobre este, como la longitud de onda o la frecuencia de la radiación. La forma más sencilla de ordenar el espectro electromagnético es de acuerdo con su longitud de onda o frecuencia. Las variaciones del campo electromagnético de propagan en el vacío a la velocidad de la luz con independencia de la frecuencia o longitud de onda.

Los diferentes grupos de ondas electromagnéticas o bandas del espectro electromagnético que existen, clasificadas en orden creciente de frecuencia y orden decreciente de longitud de onda son:

- **Ondas de radiofrecuencia:** Son las que mayor longitud de onda pueden llegar a tener, si bien este parámetro es extremadamente variable en ondas de este tipo, pues las longitudes de onda

que las caracterizan pueden ir desde varios kilómetros hasta unos pocos centímetros. La misma variabilidad afecta al parámetro frecuencia, que puede ir desde unos pocos Hertzios hasta incluso 30 GHz. Los dispositivos electrónicos que las generan lo hacen mediante la aceleración de cargas eléctricas a través de alambres conductores. Uso principal en telecomunicaciones.

- **Microondas:** Longitudes de onda comprendidas desde 1 mm hasta 30 cm y frecuencias comprendidas desde 1 GHz hasta 300 GHz. Empleadas en radares de navegación aérea, así como el estudio de las propiedades atómicas y moleculares de la materia.
- **Ondas infrarrojas:** Longitudes de onda comprendidas desde  $7 \times 10^{-7}$  m hasta 1 mm y frecuencias comprendidas desde 300 GHz hasta 400 THz. Algunos textos las denotan como ondas caloríficas dado que son desprendidas por cuerpos calientes y absorbidas por otros cuerpos en forma de calor, aumentando el estado de agitación de las partículas que componen la materia (átomos). Esto se traduce en un aumento de temperatura en el cuerpo irradiado y un descenso de temperatura en el cuerpo irradiante. Es de aplicación en terapias físicas, fotografía infrarroja y espectroscopía vibratoria, aunque también se emplean en objetos cotidianos como pueden ser los mandos a distancia de las televisiones (con estas ondas no se producen interferencias en las señales de televisión) o incluso como método de conexión entre computadoras y periféricos.

Dentro de las ondas infrarrojas, estas se pueden clasificar en varios subtipos:

- Infrarrojo cercano (0,78-1,1)
- Infrarrojo medio (1,1-15  $\mu$ m)
- Infrarrojo lejano (15-100  $\mu$ m)
- **Luz visible:** Longitudes de onda comprendidas entre  $7 \times 10^{-7}$  m (tonalidad violeta) y  $4 \times 10^{-7}$  m (tonalidad roja) y frecuencias comprendidas desde 384 THz hasta 769 THz. Constituye la banda del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir. La sensibilidad a la detección de ondas electromagnéticas pertenecientes a este rango es proporcional a la longitud de onda de estas, siendo esta sensibilidad la máxima para  $\lambda \approx 5,6 \times 10^{-7}$  m (tonalidades amarillentas/verdosas)
- **Luz ultravioleta:** Longitudes de onda comprendidas desde 60 nm y 380 nm y frecuencias desde 800 THz hasta 34 PHz. Producida principalmente por el sol y absorbida por la

estratosfera y las capas superiores de la atmosfera. Este tipo de radiación juega un papel fundamental en la síntesis de ozono a partir de oxígeno. De esta forma el ozono transforma la potencialmente cancerígena radiación ultravioleta en calor, incrementando la temperatura de la estratosfera.

Al igual que sucede con las ondas infrarrojas, estas se pueden clasificar en varios subtipos:

- **Rayos X:** Longitudes de onda comprendidas desde 0,1 nm hasta 10 nm y frecuencias comprendidas desde 24 PHz hasta los 5 EHz. Principalmente generados por medios artificiales por medio de una reducción de la velocidad de electrones altamente energéticos que bombardean blancos metálicos. Es de aplicación en diagnósticos médicos y tratamiento de radicales libres, aunque tienen la capacidad de dañar severamente organismos y tejidos vivos, motivo por el cual se debe evitar a toda costa exposiciones prolongadas o repetitivas. Además, esta radiación es de interés científico para estudiar las estructuras cristalinas de los distintos materiales sólidos, pues su longitud de onda es comparable a la distancia que separa átomos vecinos (1nm)
- **Rayos gamma:** Longitudes de onda comprendidas entre  $10^{-10}$  m y  $10^{-14}$  m y frecuencias comprendidas desde 50 EHz hasta 10 ZHz. Estas ondas electromagnéticas son emitidas por núcleos radioactivos durante el transcurso de ciertas reacciones nucleares. Son las más nocivas para los seres vivos porque tienen la mayor capacidad de penetración de todas las ondas electromagnéticas.

Tabla 2.2.1: Características de cada franja del espectro electromagnético [6]

Banda	Longitud de onda	Frecuencia	Energía
<b>Rayos gamma</b>	< 10 pm	> 30 PHz	< $20 \times 10^{-15} J$
<b>Rayos X</b>	< 10 nm	> 30 PHz	< $20 \times 10^{-18} J$
<b>Ultravioleta extremo</b>	< 200 nm	> 1,5 PHz	< $993 \times 10^{-21} J$
<b>Ultravioleta cercano</b>	< 380 nm	> 789 THz	< $523 \times 10^{-21} J$
<b>Luz visible</b>	< 780 nm	> 384 THz	< $255 \times 10^{-21} J$
<b>Infrarrojo cercano</b>	< 2,5 $\mu$ m	> 120 THz	< $79 \times 10^{-21} J$

Banda	Longitud de onda	Frecuencia	Energía
<b>Infrarrojo medio</b>	< 2,5 $\mu\text{m}$	> 6 THz	< $4 \times 10^{-21} \text{ J}$
<b>Infrarrojo lejano/submilimétricos</b>	< 1mm	> 300 GHz	< $200 \times 10^{-24} \text{ J}$
<b>Microondas</b>	< 30cm	> 1 GHz	< $2 \times 10^{-24} \text{ J}$
<b>Ultra Alta Frecuencia-Radio</b>	< 1 m	>300 MHz	< $19,8 \times 10^{-26} \text{ J}$
<b>Microondas</b>	< 10 m	> 30 MHz	< $19,8 \times 10^{-28} \text{ J}$
<b>Onda Corta-Radio</b>	< 180 m	> 1,7 MHz	< $11,22 \times 10^{-28} \text{ J}$
<b>Onda Media-Radio</b>	< 650 m	> 650 kHz	< $42,9 \times 10^{-29} \text{ J}$
<b>Onda Larga-Radio</b>	< 10 km	> 30 kHz	< $19,8 \times 10^{-30} \text{ J}$
<b>Muy Baja frecuencia- Radio</b>	> 10 km	< 30 kHz	< $19,8 \times 10^{-30} \text{ J}$

Tabla 2.2.2 Subtipos de radiación ultravioleta. [6]

Nombre	Abreviación	Longitud de onda (nm)	Energía por fotón (eV)
<b>Ultravioleta cercano</b>	NUV	400 – 200	3,1 – 6,2
<b>Onda larga</b>	UVA	400 – 320	3,1 – 3,87
<b>Onda media</b>	UVB	320 – 280	3,87 – 4,43
<b>Onda corta</b>	UVC	280 – 200	4,43 – 6,20
<b>Ultravioleta lejano</b>	FUV, VUV	200 – 10	6,2 – 124
<b>Ultravioleta extremo</b>	EUV, XUV	31 – 1	40 – 1240

Es importante mencionar que las ondas electromagnéticas se propagan a la velocidad de la luz en el vacío, aproximadamente 299,792,458 metros por segundo (aproximadamente 300,000 kilómetros por segundo). Esta velocidad es una constante universal y es la misma para todas las ondas electromagnéticas, independientemente de su frecuencia o longitud de onda. Además, las ondas

electromagnéticas son utilizadas en una amplia gama de aplicaciones en la vida cotidiana y en diversos campos de la ciencia y la tecnología. Por ejemplo:

- Las ondas de radiofrecuencia se emplean en la transmisión de señales de radio y televisión, así como en las comunicaciones inalámbricas, como las redes Wi-Fi y los teléfonos móviles.
- Las microondas son fundamentales en la tecnología de comunicaciones satelitales, en el funcionamiento de hornos de microondas y en sistemas de transmisión de datos.
- Las ondas infrarrojas se utilizan en dispositivos de visión nocturna, en sistemas de seguridad y en aplicaciones médicas, como la termografía infrarroja.
- La luz visible es esencial para la visión humana y para el funcionamiento de dispositivos ópticos, como cámaras y telescopios.
- La luz ultravioleta se emplea en la desinfección de agua y aire, en el bronceado artificial y en la fabricación de materiales sensibles a la luz.
- Los rayos X son fundamentales en la medicina para diagnósticos por imágenes, como radiografías y tomografías computarizadas, y en la investigación científica para el estudio de la estructura interna de materiales.
- Los rayos gamma tienen aplicaciones en la radioterapia para el tratamiento del cáncer y en la inspección de materiales en la industria.

## 2.3 TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN

La transferencia de calor por radiación es un proceso que no requiere de un medio físico para llevarse a cabo. Es considerada la forma más importante de transferencia de calor, ya que tiene aplicaciones en diversos procesos industriales como calentamiento, enfriamiento, secado, así como el aprovechamiento de la radiación solar. Cada punto en la superficie de un cuerpo emite radiación en todas las direcciones hacia el hemisferio opuesto que contiene el cuerpo. La cantidad de radiación emitida o incidente en una dirección específica del espacio ya sea bidimensional o tridimensional, se mide mediante el parámetro denominado "intensidad de radiación". Varios flujos de radiación, como el poder de emisión, irradiación y radiosidad se expresan en términos de la intensidad.

### 2.3.1 RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO

Cualquier cuerpo a una temperatura termodinámica por encima de cero emite radiación en todas direcciones en un amplio rango de longitudes de onda. La cantidad de energía de radiación emitida desde una superficie, a una longitud de onda dada, depende de:

- El material del que está constituido el cuerpo
- La geometría de la superficie
- La temperatura de la superficie

Es importante destacar que dos cuerpos distintos, aunque tengan la misma temperatura, geometría y estén constituidos por el mismo material, pueden emitir cantidades diferentes de radiación considerando superficies de igual área en cada uno de ellos. Esta diferencia en la radiación emitida se debe a sus propiedades intrínsecas y características específicas.

Se define un concepto fundamental conocido como "cuerpo negro", que se utiliza como un patrón estándar para comparar la radiación de diversas superficies. Un cuerpo negro es un modelo teórico que actúa como un emisor y absorbedor ideal de radiación. En términos prácticos, ninguna otra superficie puede emitir más energía que un cuerpo negro a una temperatura y longitud de onda específicas. De igual manera, el cuerpo negro tiene la capacidad de absorber toda la radiación que incide sobre él, sin importar las características de longitud de onda o tipo de radiación. Además, este cuerpo irradia energía de manera uniforme en todas las direcciones, por unidad de área en la dirección normal a la emisión. Es decir, se comporta como un emisor difuso, independiente de la dirección en la que se emite la radiación.

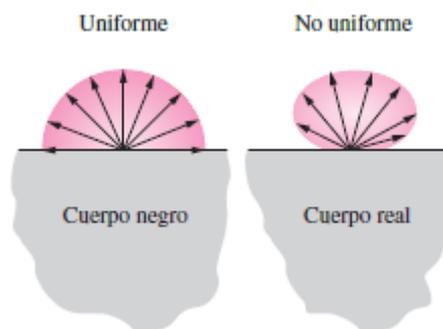


Figura 2.3.1 Comparación de la difusión de energía en forma de radiación entre un cuerpo negro y un cuerpo real. [7]

La potencia de radiación emitida por un cuerpo negro por unidad de área superficial es:

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.1)$$

En la ecuación (2.1),  $E_b(T)$  representa la potencia de radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura  $T$ , medida en vatios por metro cuadrado ( $\text{W/m}^2$ ). Aquí,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann y  $T$  es la temperatura absoluta del cuerpo en Kelvin.

La expresión es conocida como la "ley de Stefan-Boltzmann" y mide la suma de la radiación emitida en todo el espectro electromagnético (todas las longitudes de onda). Sin embargo, en muchos casos es de interés medir la cantidad de radiación emitida en una franja específica del espectro electromagnético por un cuerpo, por ejemplo, la cantidad de radiación en el espectro visible emitida por una luminaria. Con este propósito, se establece el concepto del "poder de emisión espectral de un cuerpo negro", el cual cuantifica "la cantidad de energía de radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura absoluta  $T$ , por unidad de tiempo, por unidad de área superficial y por unidad de longitud de onda alrededor de una longitud de onda particular".

La ley de Planck relaciona el poder de emisión espectral de un cuerpo negro con otras variables:

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad [\text{W/m}^3] \quad (2.2)$$

Esta ley permite calcular la cantidad de radiación emitida en una longitud de onda particular por un cuerpo negro a una temperatura dada. El valor de  $C_1$  que se indica es válido únicamente para una superficie situada en el vacío o en contacto con un gas. En otros medios, donde el índice de refracción es muy distinto a la unidad, se emplearía  $C_1/n^2$ , siendo  $n$  el índice de refracción del medio.

Se pueden hacer varias apreciaciones en la [Figura 2.3.2](#):

- Para una temperatura determinada existe una longitud de onda a la que se maximiza la radiación emitida.
- Para una longitud de onda determinada, la emisión de radiación aumenta con el incremento de la temperatura.
- Cuando se incrementa la temperatura, el máximo poder de emisión se produce en longitudes de onda progresivamente más cortas.

- El área encerrada bajo cualquier curva representa la energía total de radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura dada.

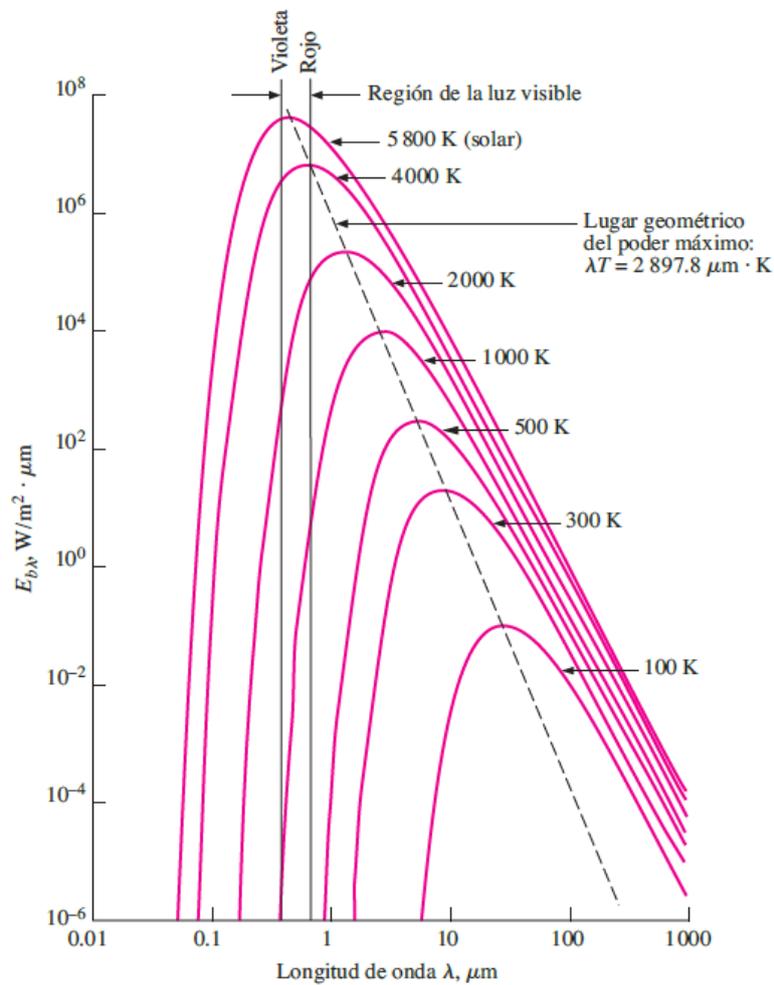


Figura 2.3.2: Variación del poder de emisión en función de la longitud de onda y de la temperatura. [7]

La Figura 2.3.2 refleja porque la radiación solar es perceptible por el ojo humano. El motivo radica en que el sol es modelizado como un cuerpo negro a unos 5800 K de temperatura, presentando su pico de emisión de radiación exactamente en la zona central de espectro visible, con unos 0,5  $\mu\text{m}$  de longitud de onda. Cualquier cuerpo que se encuentre a una temperatura baja pero suficientemente superior a la del entorno emite radiación en forma de calor, invisible para el ojo humano, pues la longitud de onda de la citada radiación se encuentra en la región infrarroja.

Cuando un objeto, como un metal, alcanza temperaturas cercanas a los 1000 K, su color se vuelve opaco y rojo a la vista humana, ya que parte del poder de emisión total del objeto corresponde a longitudes de onda en la vecindad de la frontera entre el espectro infrarrojo y el visible. A medida que la temperatura aumenta, el poder de emisión total se desplaza hacia longitudes de onda más cortas, concentrándose gradualmente en el espectro visible. En consecuencia, se observan colores más vívidos hasta que finalmente el color blanco se hace aparente cuando la temperatura sigue aumentando.

Conforme la temperatura de un cuerpo como por ejemplo un metal se acerca a los 1000 K, este presentara un color rojo opaco frente al ojo humano pues una parte del poder de emisión total del objeto se corresponde con las longitudes de onda comprendidas dentro del espectro visible, concretamente las situadas en la vecindad de la longitud de onda que delimita el espectro infrarrojo y el visible. Conforme la temperatura aumente el poder de emisión total se desplazará a longitudes de onda menores, centrándose paulatinamente en el espectro visible, observándose por ende colores de mayor viveza hasta llegar finalmente a ser observado el color blanco.



Figura 2.3.3: Pieza de metal laminado (a) y colada (b) a temperaturas que provocan una emisión de radiación en el espectro visible correspondientes al color blanco. [8]

La ley de desplazamiento de Wien permite calcular la longitud de onda para la cual se emite la máxima cantidad de radiación para una determinada temperatura. La expresión matemática de esta ley es:

$$(\lambda T)_{poder\ máx} = 2897'8 \mu m \cdot K \tag{2.3}$$

Esta ley establece una relación inversamente proporcional entre la longitud de onda y la temperatura para el máximo poder de emisión. En la [Figura 2.3.2](#) se puede observar cómo esta relación se representa gráficamente con una recta de pendiente negativa.

Cuando la radiación infrarroja emitida por objetos con temperaturas relativamente bajas no es detectable por el ojo humano, las cámaras infrarrojas entran en juego. Estas cámaras son capaces de detectar el calor emitido por el cuerpo en forma de radiación infrarroja y lo convierten en imágenes en el espectro visible. De esta manera, las personas pueden analizar cualitativa y cuantitativamente la emisión de radiación.

Es importante destacar que en objetos con temperaturas inferiores a 1000 K, su color no se debe al poder de emisión, sino a las propiedades de absorción y reflexión de la radiación visible incidente sobre su superficie. Esta radiación visible proviene de fuentes luminosas externas que tienen un poder de emisión espectral mayoritariamente en la región visible del espectro.

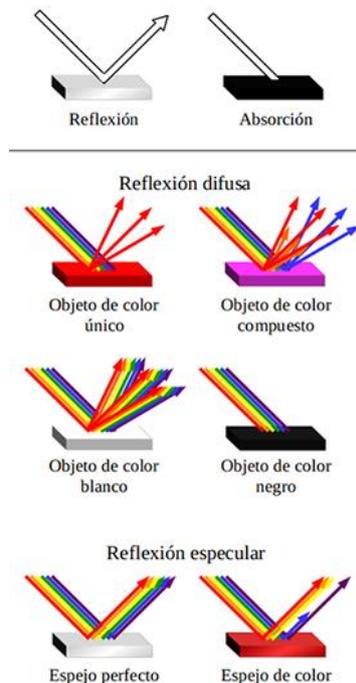


Figura 2.3.4 Reflexión y absorción de la radiación visible en cuerpos difusos y especulares. [9]

La integración del poder de emisión espectral de un cuerpo negro  $E_{b\lambda}$  sobre la totalidad de longitudes de onda existentes nos da el poder de emisión total de dicho cuerpo negro  $E_b$ :

$$E_b(T) = \int_0^{\infty} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.4)$$

Donde  $E_b(T)$  representa el área encerrada bajo cualquier curva a una determinada temperatura, lo que equivale a la energía total de radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura dada, incluyendo todas las longitudes de onda posibles.

En otras palabras, la ecuación (2.4) nos permite calcular la cantidad total de energía radiada por un cuerpo negro a una temperatura  $T$  en todas las longitudes de onda del espectro electromagnético. Esto es fundamental para entender cómo los cuerpos negros emiten radiación térmica y cómo su poder de emisión aumenta significativamente con el incremento de la temperatura, como lo indica la ley de Stefan-Boltzmann.

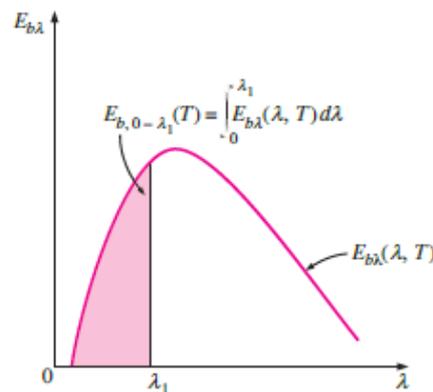


Figura 2.3.5: El área bajo la curva sombreada en rosa representa la energía de radiación emitida por un cuerpo negro, para la temperatura dada, en el rango de longitudes de onda  $0-\lambda_1$ . [7]

La cantidad de radiación emitida por un cuerpo negro por unidad de área sobre una banda de longitudes de onda, desde  $\lambda = 0$  hasta  $\lambda = \infty$ , se puede calcular mediante la ecuación (2.5):

$$E_{b,0-\lambda}(T) = \int_0^{\lambda} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.5)$$

Resolver la ecuación (2.5) directamente no es una tarea sencilla, ya que requiere integración numérica cada vez que se necesita calcular un valor de  $E_{b,0-\lambda}(T)$ , lo que puede resultar tedioso. Por esta razón, se introduce una cantidad adimensional  $f_{\lambda}(T)$ , conocida como la función de radiación de cuerpo negro:

$$(2.6)$$

$$f_{\lambda}(T) = \frac{\int_0^{\lambda} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4} \quad [\text{adimensional}]$$

Los valores de  $f_{\lambda}(T)$  se proporcionan en la [Tabla 2.3.1](#) como una función de  $\lambda T$  (en  $\mu\text{m}\cdot\text{K}$ ). Esta función es útil porque permite determinar la cantidad relativa de radiación emitida por un cuerpo negro en una banda de longitudes de onda específica en función de la temperatura del cuerpo.

En resumen, la función de radiación de cuerpo negro ( $f_{\lambda}$ ) es una herramienta que simplifica el cálculo de la cantidad de radiación emitida en una banda de longitudes de onda determinada por un cuerpo negro a una temperatura dada. Esta función se expresa en términos adimensionales para facilitar su aplicación en diferentes situaciones.

Tabla 2.3.1: Funciones  $f_{\lambda}$  de radiación de cuerpo negro. [7]

$\lambda T,$ $\mu\text{m} \cdot \text{K}$	$f_{\lambda}$	$\lambda T,$ $\mu\text{m} \cdot \text{K}$	$f_{\lambda}$
200	0.000000	6200	0.754140
400	0.000000	6400	0.769234
600	0.000000	6600	0.783199
800	0.000016	6800	0.796129
1000	0.000321	7000	0.808109
1200	0.002134	7200	0.819217
1400	0.007790	7400	0.829527
1600	0.019718	7600	0.839102
1800	0.039341	7800	0.848005
2000	0.066728	8000	0.856288
2200	0.100888	8500	0.874608
2400	0.140256	9000	0.890029
2600	0.183120	9500	0.903085
2800	0.227897	10000	0.914199
3000	0.273232	10500	0.923710
3200	0.318102	11000	0.931890
3400	0.361735	11500	0.939959
3600	0.403607	12000	0.945098
3800	0.443382	13000	0.955139
4000	0.480877	14000	0.962898
4200	0.516014	15000	0.969981
4400	0.548796	16000	0.973814
4600	0.579280	18000	0.980860
4800	0.607559	20000	0.985602
5000	0.633747	25000	0.992215
5200	0.658970	30000	0.995340
5400	0.680360	40000	0.997967
5600	0.701046	50000	0.998953
5800	0.720158	75000	0.999713
6000	0.737818	100000	0.999905

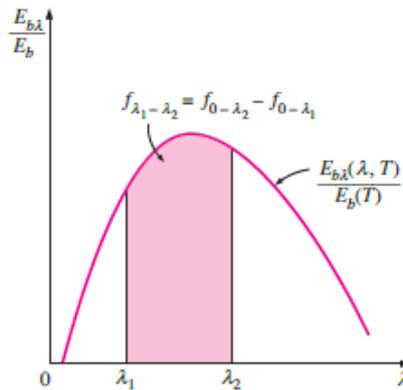


Figura 2.3.6: Representación gráfica de la fracción de radiación emitida en la banda de longitudes de onda de  $\lambda_1$  hasta  $\lambda_2$ . [7]

La energía radiante emitida por un cuerpo negro a una temperatura  $T$  sobre una banda finita y acotada de longitudes de onda (desde  $\lambda = \lambda_1$  hasta  $\lambda = \lambda_2$ ) se puede determinar e interpretar a partir de la [Figura 2.3.6](#). Esta cantidad de energía está relacionada con la diferencia entre las funciones de radiación de cuerpo negro  $f_{\lambda_1}(T)$  y  $f_{\lambda_2}(T)$  e n función de la temperatura  $T$ .

$$f_{\lambda_1-\lambda_2}(T) = \frac{\int_0^{\lambda_2} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda - \int_0^{\lambda_1} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4} = f_{\lambda_1}(T) - f_{\lambda_2}(T) \quad [\text{adimensional}] \quad (2.7)$$

Esta ecuación nos proporciona la cantidad de energía radiante emitida por el cuerpo negro dentro de la banda de longitudes de onda acotada, donde  $f_{\lambda_1-\lambda_2}(T)$  es la función de radiación de cuerpo negro para la banda de  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$ ,  $f_{\lambda_1}(T)$  es la función de radiación de cuerpo negro para  $\lambda_1$  y  $f_{\lambda_2}(T)$  es la función de radiación de cuerpo negro para  $\lambda_2$ .

### 2.3.2 INTENSIDAD DE RADIACIÓN

La radiación es emitida por todas las partes de una superficie plana en todas direcciones con una distribución generalmente uniforme. Se precisa una cantidad que describa la magnitud de la radiación emitida (o incidente) en una dirección concreta del espacio, cantidad denominada intensidad de radiación, denotada por  $I$ . El mejor sistema de coordenadas para describir la dirección de la radiación que pasa por un punto es el esférico, en términos del ángulo cenital  $\theta$  y el ángulo azimutal  $\phi$ , como se muestra en la [Figura 2.3.7](#). La intensidad de radiación describe pues la forma en la que la radiación emitida varía con los ángulos cenital y azimutal.

### 2.3.2.1 INTENSIDAD DE RADIACIÓN EMITIDA

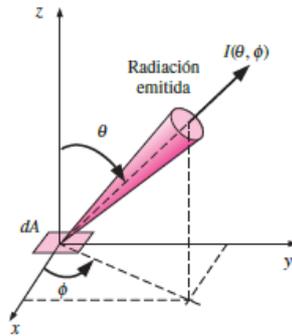


Figura 2.3.7: Intensidad de radiación (describe la variación de la energía de radiación respecto de la dirección [7])

Si todas las superficies emitieran radiación uniformemente en todas direcciones, bastaría con el poder de emisión para cuantificar la radiación; no sería necesario tratar con la intensidad. La radiación emitida por un cuerpo negro por unidad de área normal es la misma en todas direcciones (no depende de la dirección). Pero este no es el caso para las superficies reales. Antes de que definamos intensidad, necesitamos cuantificar el tamaño de una abertura en el espacio.

### 2.3.2.2 ANGULO SÓLIDO

Se denomina ángulo sólido al cuerpo tridimensional resultante de conectar todos los puntos en los bordes de un fragmento de superficie esférica con el centro de la esfera. El ángulo sólido se denota por  $\omega$  y su unidad es el estereorradián ("sr"). El área de una superficie sobre una esfera de radio unitario es equivalente en magnitud al ángulo sólido que subtiende ( $4\pi$  para una esfera de radio  $r = 1$ ).

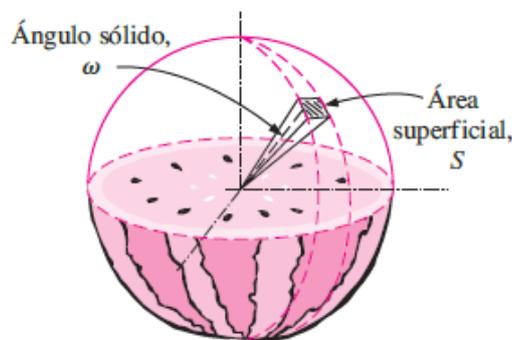


Figura 2.3.8: Rebanada de sandía de ángulo sólido  $\omega$ . [7]

### 2.3.2.3 INTENSIDAD DE RADIACIÓN EMITIDA

Un elemento diferencial de área  $dA$  de una superficie emite radiación hacia el hemisferio superior en todas las direcciones (Figura 2.3.9). La radiación que atraviesa a el área superficial  $dS$  es proporcional al ángulo sólido  $d\omega$  y al área radiante  $dA$  según la ve un observador sobre  $dS$ .

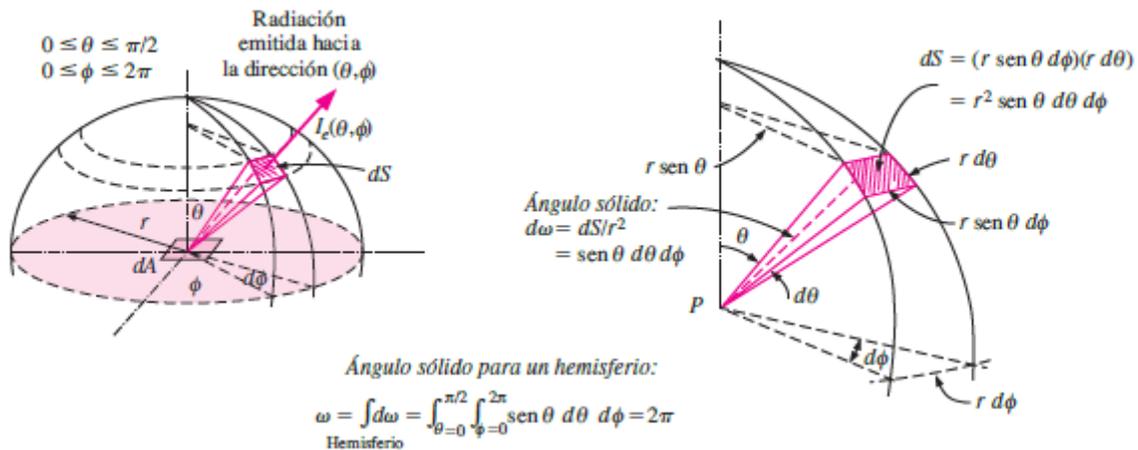


Figura 2.3.9: Emisión de radiación desde un elemento diferencial de superficie hacia el espacio hemisférico circundante a través de un ángulo sólido diferencial. [7]

La intensidad de radiación en una dirección dada se basa en un área unitaria *normal* a dicha dirección, Para proporcionar criterio común para la comparación de la radiación emitida en diferentes direcciones, se toma como referencia un área unitaria normal a la dirección en la que se busca la intensidad de radiación. Por ende, el área efectiva de  $dA$  para la emisión en la dirección de  $\theta$  es la proyección de  $dA$  sobre un plano normal a  $\theta$ , la cual es  $dA \cdot \cos \theta$ .

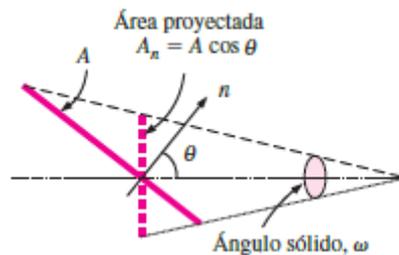


Figura 2.3.10: Proyección de  $dA$  sobre un plano normal a  $\theta$ . [7]

La intensidad de radiación  $I_e(\theta, \phi)$  se define como la razón a la cual la energía de radiación  $d\dot{Q}_e$  se emite en la dirección  $(\theta, \phi)$  por unidad de área normal a dicha dirección y por unidad de ángulo sólido en torno a esta misma dirección:

$$I_e(\theta, \phi) = \frac{d\dot{Q}_e}{dA \cdot \cos \theta \cdot d\omega} = \frac{d\dot{Q}_e}{dA \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi} \quad [\text{W/m}^2 \text{ sr}] \quad (2.8)$$

El flujo de radiación es la razón a la cual se emite la energía de radiación por unidad de área de la superficie emisora (poder de emisión), la cual se puede expresar en la forma diferencial como:

$$dE = \frac{d\dot{Q}_e}{dA} = I_e(\theta, \phi) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.9)$$

El poder de emisión hacia el hemisferio situado por encima de la superficie emisora de radiación es:

$$E = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_e(\theta, \phi) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad [\text{W/m}^2]$$

En la práctica la mayor parte de las superficies se pueden considerar como si fueran difusas. En una superficie difusamente emisora, la intensidad de la radiación emitida no depende de la dirección ( $I_e = cte$ ):

$$E = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_e \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi = \pi I_e \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.10)$$

Para un cuerpo negro, el cual es un emisor difuso:

$$E_b = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_b \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi = \pi I_b \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.11)$$

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.12)$$

$$I_b(T) = \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{sr}] \quad (2.13)$$

#### 2.3.2.4 RADIACIÓN INCIDENTE

Todas las superficies, a la vez que emiten radiación, también reciben la emitida o reflejada por otras superficies. La intensidad de la radiación incidente,  $I_i(\theta, \phi)$  se define como la razón a la cual la

energía de radiación  $dG$  incide desde la dirección  $(\theta, \phi)$  por unidad de área de la superficie receptora normal a esta dirección y por unidad de ángulo sólido alrededor de esta última (Figura 2.3.11). En esta ocasión,  $\theta$  es el ángulo entre la dirección de la radiación incidente y la normal a la superficie.

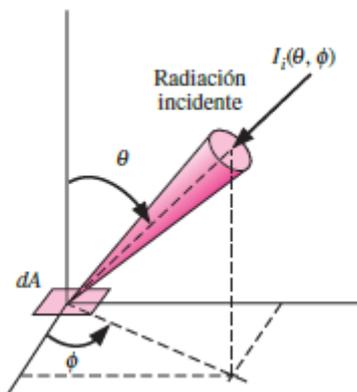


Figura 2.3.11: Radiación incidente sobre una superficie en la dirección  $(\theta, \phi)$ . [7]

El flujo de radiación incidente desde todas las direcciones sobre una superficie se llama irradiación  $G$  y se expresa como:

$$G = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_i(\theta, \phi) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi = \pi I_e \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.14)$$

Cuando la radiación incidente es difusa,  $I_i$  es constante y la irradiación se puede expresar como:

$$G = \pi I_i \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.15)$$

Se debe tener en cuenta que:

- La irradiación se basa en el área superficial real (factor  $\cos \theta$ ).
- La intensidad de la radiación se basa en el área proyectada.

### 2.3.2.5 RADIOSIDAD

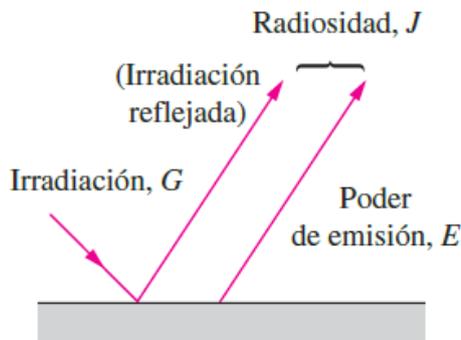


Figura 2.3.12: Poder de emisión, irradiación y radiosidad. [7]

La radiación proveniente de una superficie consta de componentes emitidas y reflejadas. La radiosidad  $J$  se define como la cantidad que representa la razón a la cual la energía de radiación sale de una unidad de área de una superficie en todas direcciones y se expresa:

$$J = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{e+r}(\theta, \phi) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.16)$$

Para una superficie que emite y refleja difusamente  $I_{e+r} = cte$  y la radiosidad se reduce a:

$$J = \pi I_{e+r} \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.17)$$

Para un cuerpo negro la radiosidad  $J$  es equivalente al poder de emisión  $E_b$ , pues este tipo de cuerpos absorben toda la radiación incidente y no reflejan ninguna fracción de radiación (solo emiten radiación).

### 2.3.2.6 CANTIDADES ESPECTRALES

Hasta este momento se han considerado cantidades “totales” de radiación (cantidades que abarcan la totalidad de longitudes de onda) y sin haberse hecho ninguna referencia a la dependencia de estas cantidades con respecto a la longitud de onda. Las cantidades espectrales consideran la variación de la radiación con la dirección y la longitud de onda (se usa el modificador "espectral" para referenciar una longitud de onda particular).

La intensidad espectral para la radiación emitida  $I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi)$  se puede definir como la razón a la cual la energía de radiación  $d\dot{Q}_e$  es emitida a la longitud de onda  $\lambda$  en la dirección  $(\theta, \phi)$  por unidad de área normal a esta dirección, por unidad de ángulo sólido en torno a esta última y se puede expresar como:

$$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{d\dot{Q}_e}{dA \cdot \cos \theta \cdot d\omega} = \frac{d\dot{Q}_e}{dA \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \cdot d\lambda} \quad [\text{W/m}^2 \text{ sr } \mu\text{m}] \quad (2.18)$$

Por lo que el poder de emisión espectral  $E_\lambda$  es:

$$E_\lambda = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.19)$$

Como es lógico, por analogía se puede obtener irradiación espectral  $G_\lambda$  y la radiosidad espectral  $J_\lambda$  reemplazando  $I_{\lambda,e}$  en esta ecuación por  $I_{\lambda,i}$  e  $I_{\lambda,e+r}$  respectivamente.

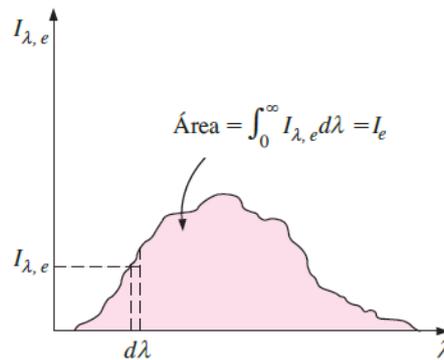


Figura 2.3.13: La integración de una cantidad “espectral” para todas las longitudes de onda da la cantidad “total”. [7]

Si se conocen de qué forma varía la intensidad de radiación espectral  $I_{\lambda,e}$  para cada longitud de onda  $\lambda$  se puede determinar la intensidad total de radiación  $I$  (para la radiación emitida, la incidente y la emitida más la reflejada) por integración a lo largo del espectro de longitudes de onda (Figura 2.3.13)

Se pueden sustituir las siguientes intensidades en las ecuaciones (2.11), (2.14) y (2.16) para determinar el poder de emisión  $E$ , la irradiación  $G$  y la radiosidad  $J$ :

$$I_e = \int_0^\infty I_{\lambda,e} \cdot d\lambda \quad I_i = \int_0^\infty I_{\lambda,i} \cdot d\lambda \quad I_{e+r} = \int_0^\infty I_{\lambda,e+r} \cdot d\lambda \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.20)$$

Del mismo modo, si se conoce como varían los flujos de radiación espectral  $E_\lambda$ ,  $G_\lambda$  y  $J_\lambda$  con la longitud de onda  $\lambda$  se pueden determinar los flujos totales de radiación por integración sobre todo el espectro de longitudes de onda:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda \cdot d\lambda \quad J = \int_0^\infty J_\lambda \cdot d\lambda \quad G = \int_0^\infty G_\lambda \cdot d\lambda \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.21)$$

En superficies difusas con radiación incidente difusa, los flujos de radiación espectrales son:

$$E_\lambda = \pi I_{\lambda,e} \quad G_\lambda = \pi I_{\lambda,i} \quad J_\lambda = \pi I_{\lambda,e+r} \quad (2.22)$$

La intensidad espectral a una longitud de onda  $\lambda$  emitida por un cuerpo negro que está a una temperatura  $T$  se expresa:

$$I_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda [\exp(hc_0/\lambda kT) - 1]} \quad [\text{W/m}^2 \text{ sr } \mu\text{m}] \quad (2.23)$$

## 2.4 TERMOGRAFÍA TEORÍA

### 2.4.1 LA CÁMARA TERMOGRÁFICA

Una cámara termográfica es un equipo complejo que tiene por propósito medir la emisión natural de radiación infrarroja de un objeto, determinar su temperatura y generar una imagen térmica, realizando un procesamiento digital de las señales detectadas. El principio de funcionamiento de la cámara termográfica se basa en hacer converger sobre su detector, por medio de la óptica, la radiación infrarroja emitida por el objeto de estudio. De esta forma se obtiene una respuesta (cambio de tensión o resistencia eléctrica) que será leída por los elementos electrónicos (placa electrónica). La señal electrónica se convierte en una imagen electrónica por pantalla donde los distintos tonos de color se corresponden con diferentes señales de radiación infrarroja procedentes del objeto de estudio. Las cámaras termográficas actuales son portátiles, muy fáciles de manejar y con una velocidad de respuesta alta (en el orden de los milisegundos o microsegundos).

#### 2.4.1.1 CLASIFICACIÓN DE LAS CÁMARAS TERMOGRÁFICAS

Existen varias formas de clasificar las cámaras termográficas:

- **Clasificación según el rango espectral:**

- **Cámaras infrarrojas de banda única:** Estas cámaras pueden detectar y medir la radiación infrarroja en una sola banda espectral específica, como infrarrojo cercano (NIR) o infrarrojo medio (MIR). Son útiles para aplicaciones especializadas que requieren mediciones precisas en un rango de longitud de onda específico.
- **Cámaras infrarrojas de banda múltiple:** A diferencia de las de banda única, estas cámaras pueden detectar y medir la radiación infrarroja en múltiples bandas espectrales. Esto permite obtener más información sobre el objeto o la escena bajo observación y proporciona imágenes con mayor detalle y precisión.

Tabla 2.4.1: Respuesta espectral de las cámaras termográficas. [6]

TIPO DE ONDA	LONGITUD DE ONDA
Onda corta	0,8 $\mu\text{m}$ a 2,5 $\mu\text{m}$
Onda media	2,5 $\mu\text{m}$ a 5,5 $\mu\text{m}$
Onda larga	7,5 $\mu\text{m}$ a 14 $\mu\text{m}$

- **Clasificación según la resolución térmica:**

- **Cámaras de alta resolución:** Tienen una mayor cantidad de píxeles en el sensor, lo que les permite capturar imágenes con detalles térmicos más finos. Son adecuadas para aplicaciones que requieren una alta precisión y detección de pequeñas variaciones de temperatura.
- **Cámaras de baja resolución:** Tienen menos píxeles en el sensor, lo que puede limitar la precisión de las mediciones. Son más adecuadas para aplicaciones donde no se requiere una alta resolución térmica y se prioriza un costo más bajo.

- **Clasificación según la sensibilidad térmica:**

- **Cámaras de alta sensibilidad térmica:** Estas cámaras son capaces de detectar pequeñas diferencias de temperatura, incluso en condiciones de baja emisividad. Son ideales para detectar puntos calientes y anomalías térmicas sutiles.
- **Cámaras de baja sensibilidad térmica:** Tienen una menor capacidad para detectar pequeñas variaciones de temperatura y pueden requerir condiciones de alta emisividad o temperaturas extremas para obtener mediciones precisas.
- **Clasificación según el tipo de detector:**
  - **Cámaras con detector de matriz:** Estas cámaras utilizan un conjunto de detectores dispuestos en una matriz para captar la radiación infrarroja en diferentes puntos de la escena. Son las más comunes y ofrecen una buena combinación de resolución y sensibilidad térmica.
  - **Cámaras con detector de microbolómetros:** Utilizan microbolómetros para detectar la radiación infrarroja. Son más económicas y compactas, pero pueden tener una menor resolución y sensibilidad térmica en comparación con las cámaras con detector de matriz.
- **Según la tecnología del detector:**
  - **Cámaras infrarrojas con detectores criogenizados:** los detectores están contenidos en un estuche sellado al vacío y mantenidos a una temperatura de varios grados Celsius bajo cero por medio de un voluminoso y costoso equipo criogénico. De esta forma se aumenta en gran medida la sensibilidad con respecto a los detectores al ambiente, dada la gran diferencia de temperatura del sensor de la cámara con respecto al cuerpo emisor detectado. Aun así, el uso de detectores criogenizados presenta unas desventajas como son:
    - Elevado consumo de energía para mantener los detectores refrigerados
    - Elevado coste de fabricación y sellado al vacío de los estuches
    - Considerable tiempo necesario (varios minutos) para enfriar el sensor del detector a la temperatura óptima de operación

- **Cámaras infrarrojas con detectores al ambiente:** Los avances en la tecnología de detectores termográficos han permitido el desarrollo de sensores que operan a temperatura ambiente o se estabilizan mediante pequeños elementos de control a una temperatura cercana a la temperatura ambiente para reducir las interferencias de percepción de imagen. Estos detectores modernos utilizan materiales ferroeléctricos, piroeléctricos o tecnología del microbolómetro para detectar cambios en sus propiedades eléctricas cuando se calientan por la radiación infrarroja.

En comparación con los detectores criogenizados, estos detectores al ambiente ofrecen algunas ventajas importantes, como un menor coste y un menor tamaño. Esto los hace más accesibles y prácticos para su uso en cámaras termográficas portátiles y de uso general.

Sin embargo, también presentan algunas desventajas en comparación con los detectores criogenizados, como una menor sensibilidad y menor resolución. Esto significa que los detectores al ambiente pueden tener una capacidad de medición de temperaturas más limitada y una menor capacidad para detectar diferencias sutiles en la radiación infrarroja.

- pesar de estas desventajas, los detectores al ambiente han demostrado ser una opción eficiente y efectiva para muchas aplicaciones de termografía, especialmente en situaciones donde el costo y el tamaño son factores importantes a considerar. Los avances en la tecnología continúan mejorando la sensibilidad y resolución de estos detectores, lo que los convierte en una opción cada vez más viable para una amplia gama de aplicaciones termográficas.
- **Según la técnica de termografía utilizada:**
    - **Cámaras infrarrojas activas:** Estas cámaras operan mediante la estimulación de la respuesta térmica del objeto bajo estudio. Utilizan un elemento auxiliar que emite radiación infrarroja con un reflector, ya sea integrado en la cámara o ubicado en otra posición. El haz de luz infrarroja ilumina el objeto a estudiar o detectar, permitiendo que la cámara capte y genere una imagen monocromática para su interpretación. Los reflectores están equipados con filtros para evitar la interferencia de la luz visible en el proceso. La mayoría de las cámaras activas portátiles cuentan con un reflector de

alcance limitado, generalmente de hasta 100 metros, aunque algunos fabricantes han logrado ampliar dicho alcance a varios cientos de metros para mejorar el rendimiento.

- **Cámaras infrarrojas pasivas:** Este tipo de cámaras termográficas no utilizan reflectores y captan la radiación infrarroja tal como es emitida por el objeto. No detectan cuerpos con la misma temperatura que el detector, por lo que suelen estar enfriadas criogénicamente. Algunas de estas cámaras tienen una alta sensibilidad de hasta 0,01 °C y se utilizan para rastrear personas en áreas de visibilidad reducida, como en condiciones de oscuridad, humo o niebla. También son empleadas para detectar rastros recientes de personas que han dejado un lugar, seguir automóviles, identificar rastros de humedad en superficies y otras aplicaciones. Entre sus características destacadas se encuentran:
  - Alta resolución de temperaturas, lo que resulta en termogramas con alto contraste.
  - Fácil manejo y software integrado para un uso sencillo y eficiente.
  - Escala de temperatura lineal para una interpretación más precisa de los resultados.
  - Rápida visualización de imágenes para una toma de decisiones ágil.
  - Posibilidad de controlar la cámara a largas distancias a través de conexión Ethernet.
  - Portabilidad y operación independiente gracias a baterías de Li-ION intercambiables.
- **Clasificación según la forma y el diseño de la cámara:**
  - **Cámaras termográficas portátiles:** Son dispositivos compactos, livianos y de fácil transporte, destinados a realizar inspecciones puntuales o en áreas de difícil acceso. Estas cámaras pueden estar equipadas con sistemas de refrigeración o no refrigeradas, según sus especificaciones técnicas y aplicaciones.
  - **Cámaras termográficas tipo turret:** Estas cámaras presentan un diseño versátil en el que la cabeza de la cámara puede moverse en diferentes direcciones, brindando mayor

flexibilidad en la captura de imágenes y mediciones. Por lo general, este tipo de cámaras se encuentran equipadas con sistemas de refrigeración para garantizar un rendimiento óptimo en diversas condiciones de trabajo.

- **Cámaras termográficas tipo bala:** Con un diseño más fijo, estas cámaras están especialmente destinadas a tareas de vigilancia y seguridad en exteriores. Al igual que las anteriores, pueden estar disponibles en versiones refrigeradas o no refrigeradas, dependiendo de las especificaciones del fabricante y las necesidades del usuario..
- **Clasificación según el modo de funcionamiento:**
  - **Cámaras termográficas de imagen en tiempo real:** Estas cámaras pueden capturar y mostrar imágenes termográficas en tiempo real, lo que permite una visualización continua de las temperaturas y patrones térmicos en la escena. Son ideales para aplicaciones donde es necesario monitorear y analizar cambios térmicos en tiempo real.
  - **Cámaras termográficas de imagen estática:** Estas cámaras capturan una sola imagen termográfica y la muestran como una fotografía estática. Son útiles cuando se requiere una instantánea de la distribución de temperatura en un momento específico o para realizar análisis y estudios posteriores.

## 2.4.1.2 PARTES DE UNA CÁMARA TERMOGRÁFICA

Una cámara termográfica consta de tres partes principalmente:

- **Receptor óptico**
  - **La lente:** A través de ella entra la energía infrarroja emitida por el objeto. Está fabricado en material transparente a la radiación infrarroja (Germanio o el Silicio) y son revestidos con antireflexivos para mejorar las características ópticas y aumentar la eficiencia de transmisión de energía.
  - **El diafragma:** Es denominado unidad de apertura y permite selecciona la cantidad de energía que ingresa al sistema, la apertura se selección de acuerdo con el nivel de temperatura que se desea observar.
  - **El filtro:** Permite seleccionar la calidad de energía infrarroja que ingresa al sistema, eliminando la radiación con longitudes de onda no deseadas. Normalmente no se usa

filtro, pero puede ser necesario un filtro especial cuando se desea ver y medir las temperaturas de gases calientes o cuando se quieran eliminar puntos calientes provocados por reflejos cuando se hacen inspecciones en lugares abiertos.

- **Detector infrarrojo:** Convierte la energía radiada en una señal eléctrica que posteriormente será procesada. Los detectores están contruidos con materiales semiconductores y operan a muy bajas temperaturas para evitar interferencias (por ruido térmico) y así obtener una relación señal/ruido que corresponda a la alta sensibilidad que poseen estas cámaras.
- **Microprocesador y electrónica de control:** Se encargan de manejar la salida de la imagen generada a partir de la interacción de los fotones de la energía emitida por el objeto y los electrones del material detector que genera una señal eléctrica proporcional a la energía que ingresa al sistema. Dentro de la cámara están ubicado cuerpos negros de referencia con los que se hace una comparación varias veces por segundo para así mantener un control permanente sobre la compensación (offset) y la ganancia, haciendo de la cámara un instrumento de altísima precisión en la medición de temperaturas.

### 2.4.1.3 FUNCIONAMIENTO DE UNA CAMARA TERMOGRÁFICA

El funcionamiento de una cámara termográfica durante una inspección se basa en el procesamiento de la energía infrarroja emitida y reflejada por el objeto a estudiar, con el objetivo de obtener una imagen térmica donde se pueda visualizar y medir la temperatura real de dicho objeto. Para lograr una medición precisa, la cámara debe tener en cuenta varios efectos presentes en el ambiente durante la inspección termográfica:

- a) El objeto no solo emite su propia energía infrarroja, sino que también refleja la energía emitida por otros objetos cercanos. Para tener en cuenta este fenómeno, la cámara realiza cálculos internos basados en los valores de temperatura ambiente reflejada y la emisividad de la superficie del objeto. El termógrafo debe medir y tener en cuenta estos datos al realizar la inspección para obtener mediciones precisas de la temperatura real del objeto.
- b) Parte de la energía infrarroja emitida por el objeto es absorbida por la atmósfera antes de llegar al sensor de la cámara. Para compensar este efecto, la cámara debe tener en cuenta la distancia al objeto a inspeccionar, la humedad relativa y la temperatura atmosférica. Estos parámetros

influyen en la cantidad de energía infrarroja que llega al sensor, y su consideración es esencial para obtener mediciones de temperatura precisas y confiables.

El proceso de funcionamiento de la cámara termográfica durante una inspección puede resumirse en los siguientes pasos:

- 1) Lectura de la energía infrarroja aparente que llega al sensor de la cámara desde el objeto en estudio.
- 2) Cálculo de la energía infrarroja que sale del objeto teniendo en cuenta los datos de distancia al objeto, humedad relativa y temperatura atmosférica. Estos factores afectan la cantidad de energía infrarroja que atraviesa la atmósfera antes de llegar al sensor.
- 3) Resta de la energía infrarroja reflejada por el objeto, considerando los valores de temperatura ambiente reflejada y la emisividad de la superficie del objeto.
- 4) Estimación de la energía infrarroja emitida por el objeto, basada en los datos de temperatura ambiente reflejada y la emisividad de la superficie del objeto.

Al llevar a cabo estos cálculos y correcciones, la cámara termográfica puede obtener una imagen térmica precisa y confiable, mostrando la temperatura real del objeto en estudio y permitiendo al termógrafo realizar análisis y evaluaciones termográficas de manera efectiva.

#### 2.4.1.4 CARACTERÍSTICAS CLAVE A CONSIDERAR PARA ELEGIR UNA CÁMARA TERMOGRÁFICA

En la selección de una cámara termográfica, es esencial tener en cuenta una serie de características clave que afectarán su rendimiento y capacidad para abordar aplicaciones específicas. A continuación, se describen algunas de las principales características a considerar:

- **Sensibilidad Térmica (NETD):** La sensibilidad térmica, también conocida como NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) en inglés, hace referencia al nivel de ruido equivalente a la menor temperatura que una cámara termográfica puede medir con precisión. Se expresa en milésimas de grados Kelvin (mK) y es un parámetro crítico en aplicaciones de ensayos no destructivos. Cuanto más bajo es el valor de NETD, mejor puede la cámara detectar un contraste térmico sobre el ruido del sistema. Una baja sensibilidad térmica permite visualizar y medir diferencias de temperatura más pequeñas,

lo que resulta fundamental en situaciones donde se requiere identificar detalles sutiles o anomalías térmicas en la superficie del objeto o en la escena inspeccionada.

- Precisión:** La precisión de una cámara termográfica se refiere a la medida de dispersión de las temperaturas medidas en comparación con las temperaturas reales de los objetos inspeccionados. La precisión se expresa generalmente como una cifra en grados Celsius (°C) o como un porcentaje de error con respecto a la temperatura verdadera del objeto, por ejemplo, " $\pm 2^{\circ}\text{C}$  o  $\pm 2\%$ ". Una precisión alta indica que las mediciones térmicas realizadas con la cámara son muy cercanas a las temperaturas reales de los objetos, lo que garantiza resultados más confiables y precisos en diversas aplicaciones. Las cámaras termográficas modernas ofrecen niveles de precisión muy altos, lo que las convierte en herramientas confiables y efectivas para la inspección y análisis termográfico.
- Resolución y Campo de Visión (FOV):** La resolución se relaciona con el tamaño del píxel en la imagen capturada por la cámara. Los píxeles representan unidades de energía infrarroja del objeto o escena inspeccionada, permitiendo construir una representación visual de la distribución de temperaturas. El campo de visión (FOV) determina el ángulo horizontal visible a través de la lente de infrarrojos, lo que define el área o región de la escena capturada por la cámara.
- IFOV (Campo de Visión Instantáneo):** El IFOV, o Campo de Visión Instantáneo, representa la medida de la resolución geométrica y se determina por el "pitch" del detector y el tamaño de la lente. Un IFOV más pequeño indica una mayor resolución y la capacidad para detectar detalles más pequeños en la escena inspeccionada.

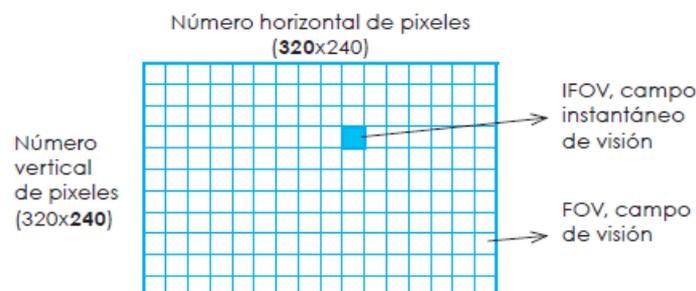


Figura 2.4.1: Píxel, FOV e IFOV. [10]

- **Frecuencia de la imagen:** las cámaras actuales actualizan las imágenes a una tasa de centenares de Hz (fotogramas por segundos) e inclusive permiten aumentar la tasa de actualización a varios millares de Hz en detrimento del tamaño de la imagen. Esta característica es importante cuando el sistema observado es un buen conductor del calor, situación que implica tiempos característicos muy cortos.
- **Respuesta espectral:** La respuesta espectral se refiere a la gama de longitudes de onda infrarrojas que la cámara puede detectar. Existen diferentes bandas de infrarrojos, como el infrarrojo cercano, medio e infrarrojo lejano. La elección de la respuesta espectral dependerá de la aplicación específica y del tipo de objetos o materiales que se deseen inspeccionar.
- **Rango de temperatura:** Cada cámara termográfica tiene un rango de temperatura específico en el cual puede medir con precisión. Es importante seleccionar una cámara con un rango de temperatura adecuado para la aplicación prevista, asegurándose de que pueda cubrir tanto las temperaturas mínimas como las máximas que se esperen medir.
- **Capacidad de almacenamiento y transferencia de datos:** Las cámaras termográficas pueden producir una gran cantidad de datos, especialmente cuando se realizan inspecciones prolongadas o en grandes áreas. Por lo tanto, es relevante considerar la capacidad de almacenamiento interno de la cámara y su capacidad para transferir los datos a otros dispositivos o sistemas para su posterior análisis.
- **Detección de puntos calientes y fríos:** Algunas cámaras termográficas cuentan con la función de detección automática de puntos calientes (hot spots) y fríos (cold spots), lo que permite identificar de manera rápida y eficiente las áreas con anomalías térmicas significativas. Esta característica puede ser especialmente útil en aplicaciones de mantenimiento predictivo.
- **Conectividad y compatibilidad:** Es importante asegurarse de que la cámara termográfica sea compatible con el software y los sistemas utilizados para el análisis y la interpretación de las imágenes termográficas. Además, la capacidad de conectividad, como puertos USB o conexión inalámbrica, puede facilitar la transferencia de datos y el control remoto de la cámara.

Estas son algunas de las características adicionales que se pueden tener en cuenta al elegir una cámara termográfica. Cada aplicación tendrá requisitos específicos, por lo que es esencial evaluar cuidadosamente las características y capacidades de diferentes modelos de cámaras antes de tomar una decisión final.

## 2.4.2 CALIBRACIÓN

En la termografía infrarroja actual, asegurar la fiabilidad de las mediciones realizadas con cámaras termográficas es de suma importancia, y esto se logra mediante la calibración metrológica y la verificación.

Las cámaras termográficas son sometidas a una calibración térmica con el propósito de proporcionar información térmica precisa. Este proceso de calibración y verificación se basa en el uso de cuerpos negros, que evitan la reflexión de radiación y generan condiciones trazables de temperatura controlada. Durante la calibración, se establece la relación entre la radiación y la temperatura (mayor temperatura resulta en mayor radiación), utilizando múltiples fuentes de referencia, es decir, cuerpos negros a diferentes temperaturas. A estos cuerpos negros se les mide la temperatura con termómetros de alta precisión. Una vez obtenida la curva de calibración, a partir de la señal de radiación del cuerpo negro, se puede determinar con precisión la temperatura del objeto en estudio.

Es fundamental que al adquirir una cámara termográfica, esta se encuentre debidamente calibrada y preparada para llevar a cabo las inspecciones. Para garantizar la calidad y confiabilidad de la cámara, es esencial contar con un Certificado de Calibración que incluya el modelo de la cámara, su número de serie y la fecha de calibración.

Para asegurar una operación óptima, se recomienda:

- Escanear el certificado de calibración o mantenerlo fácilmente localizable, ya que en ciertos casos los clientes pueden solicitarlo para determinadas inspecciones.
- Realizar una calibración anual en laboratorios acreditados, especialmente si se hace un uso frecuente de la cámara.
- Reparar el equipo en caso de que la curva que relaciona la radiación con la temperatura se desajuste, asegurando así mediciones precisas y confiables.

La calibración de una cámara termográfica es una etapa crítica para asegurar la precisión y confiabilidad de las mediciones térmicas, lo que resulta fundamental en aplicaciones como ensayos no destructivos y evaluación de condiciones en diferentes industrias.

### 2.4.3 FUNCIONALIDADES AVANZADAS DE LAS CÁMARAS TERMOGRÁFICAS

- **Rango:** El rango en una cámara termográfica establece los límites de las temperaturas máxima y mínima que pueden medirse con el equipo. La función del rango es evitar que la cámara se sature al recibir un exceso de radiación que no aporte información relevante para el análisis termográfico. Si el objeto o superficie que se desea estudiar se encuentra a una temperatura fuera del rango elegido, la imagen resultante podría quemarse y perder detalles importantes.

Es esencial seleccionar un rango adecuado para cada inspección, considerando las temperaturas esperadas en el objeto en estudio. Optar por un rango demasiado amplio puede disminuir la precisión y sensibilidad de la cámara, mientras que un rango estrecho podría limitar la capacidad de detectar variaciones térmicas sutiles.

- **Campo o Contraste Térmico:** El campo en una cámara termográfica, también conocido como contraste térmico, hace referencia al intervalo de temperaturas que se pueden observar durante la inspección. En algunos casos, es posible fijar manualmente el campo, mientras que, en otras cámaras, el equipo ajusta automáticamente el campo según las temperaturas más altas y bajas que detecta.

Un campo adecuado es crucial para obtener imágenes térmicas claras y detalladas. Si el campo es demasiado amplio, las diferencias térmicas pueden no ser suficientemente resaltadas, dificultando la interpretación de la imagen. Por otro lado, un campo estrecho puede ocasionar que pequeñas variaciones de temperatura queden fuera de rango, perdiendo información valiosa.

- **Nivel:** El nivel en una cámara termográfica representa el punto medio del campo de temperatura que se está observando. Es decir, es el valor que se encuentra exactamente en el centro del rango de temperaturas medibles por la cámara. Este parámetro es

esencial para establecer una referencia térmica en la imagen y ayuda a determinar las diferencias de temperatura con respecto al nivel.

El ajuste adecuado del nivel contribuye a una mejor visualización de las diferencias térmicas en la imagen, facilitando la detección de anomalías o puntos calientes y fríos en el objeto bajo inspección.

- **Puntero de medida:** El puntero de medida en una cámara termográfica puede ser fijo o móvil, y su función es marcar una zona concreta de la imagen donde se realizará la medición de temperatura. Al seleccionar un área específica con el puntero de medida, la cámara proporcionará la temperatura correspondiente a esa región en particular. Esta función es especialmente útil al realizar inspecciones en objetos o sistemas complejos, ya que permite enfocarse en áreas de interés específicas y obtener mediciones precisas de temperatura en puntos concretos.

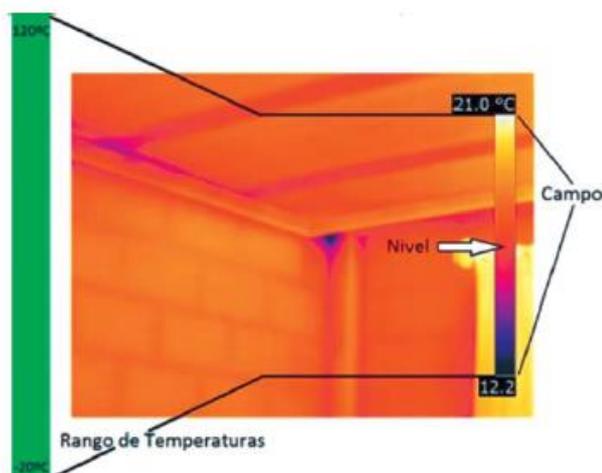


Figura 2.4.2:Rango, campo y nivel. [1]

- **Punto frío y punto caliente:** En una cámara termográfica, el punto frío y el punto caliente son representaciones visuales en tiempo real de las temperaturas más bajas y más altas que se están detectando en la imagen térmica. Estos puntos se muestran generalmente con diferentes colores para resaltar las diferencias de temperatura en el objeto o superficie bajo inspección.

El punto frío aparecerá en la imagen como una región de color más oscuro o azul, mientras que el punto caliente se mostrará como una región de color más claro o rojo.

Esta característica es valiosa para identificar de manera rápida las áreas con temperaturas extremas o anómalas en el campo de visión de la cámara.

- **Área de medida:** La función de área de medida en una cámara termográfica permite seleccionar una zona determinada de la imagen para visualizar las temperaturas máximas y mínimas presentes en esa región específica. Al enfocarse en un área particular, el usuario puede obtener información detallada sobre las variaciones de temperatura en esa ubicación concreta.

Esta capacidad es útil en aplicaciones donde es importante analizar temperaturas en regiones específicas de un objeto o sistema. La visualización del punto frío y caliente en un área de medida específica facilita la identificación de posibles puntos críticos o anomalías térmicas localizadas.

- **Isoterma:** La isoterma es una herramienta en una cámara termográfica que asigna un mismo color a las zonas de la imagen que poseen la misma temperatura. Esto permite generar un mapa térmico con colores representativos de diferentes rangos de temperatura, lo que facilita la identificación y el análisis de patrones térmicos. Por ejemplo, el termógrafo puede configurar la cámara para que todas las áreas con temperaturas entre 20 °C y 25 °C aparezcan en color verde, mientras que las temperaturas entre 25 °C y 30 °C se muestren en color amarillo. De esta manera, la isoterma ayuda a visualizar las distribuciones térmicas y a detectar patrones específicos de temperatura en la imagen.

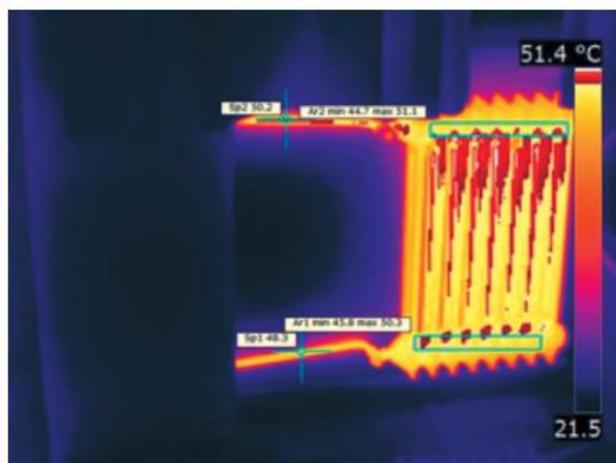


Figura 2.4.3: Imagen termográfica con puntos fijos, áreas y una isoterma. [1]

- **Punto frío y punto caliente:** En una cámara termográfica, el punto frío y el punto caliente son representaciones visuales en tiempo real de las temperaturas más bajas y más altas que se están detectando en la imagen térmica. Estos puntos se muestran generalmente con diferentes colores para resaltar las diferencias de temperatura en el objeto o superficie bajo inspección.

El punto frío aparecerá en la imagen como una región de color más oscuro o azul, mientras que el punto caliente se mostrará como una región de color más claro o rojo. Esta característica es valiosa para identificar de manera rápida las áreas con temperaturas extremas o anómalas en el campo de visión de la cámara.

- **Área de medida:** La función de área de medida en una cámara termográfica permite seleccionar una zona determinada de la imagen para visualizar las temperaturas máximas y mínimas presentes en esa región específica. Al enfocarse en un área particular, el usuario puede obtener información detallada sobre las variaciones de temperatura en esa ubicación concreta.

Esta capacidad es útil en aplicaciones donde es importante analizar temperaturas en regiones específicas de un objeto o sistema. La visualización del punto frío y caliente en un área de medida específica facilita la identificación de posibles puntos críticos o anomalías térmicas localizadas.

- **Isoterma:** La isoterma es una herramienta en una cámara termográfica que asigna un mismo color a las zonas de la imagen que poseen la misma temperatura. Esto permite generar un mapa térmico con colores representativos de diferentes rangos de temperatura, lo que facilita la identificación y el análisis de patrones térmicos.

Por ejemplo, el termógrafo puede configurar la cámara para que todas las áreas con temperaturas entre 20 °C y 25 °C aparezcan en color verde, mientras que las temperaturas entre 25 °C y 30 °C se muestren en color amarillo. De esta manera, la isoterma ayuda a visualizar las distribuciones térmicas y a detectar patrones específicos de temperatura en la imagen.

- **Paletas de Colores:** Las cámaras termográficas permiten seleccionar diferentes paletas de colores para visualizar las temperaturas en la imagen térmica. Estas paletas asignan

colores específicos a diferentes rangos de temperatura, lo que facilita la identificación y análisis de puntos calientes y fríos en la imagen.

- **Medición Automática de Puntos Calientes y Fríos:** Algunas cámaras termográficas cuentan con la función de medición automática de puntos calientes y fríos, lo que permite identificar y resaltar automáticamente las áreas más calientes y más frías en la escena sin necesidad de realizar mediciones manuales.
- **Análisis de Tendencias:** Algunas cámaras termográficas avanzadas ofrecen la capacidad de realizar análisis de tendencias, lo que permite monitorizar cambios en la temperatura a lo largo del tiempo. Esto es especialmente útil para detectar problemas de sobrecalentamiento o enfriamiento en equipos o procesos a lo largo de una cierta duración.
- **Marcadores de Temperatura:** Las cámaras termográficas pueden incluir marcadores de temperatura que permiten etiquetar puntos específicos en la imagen con sus respectivas temperaturas. Estos marcadores facilitan la identificación y documentación de puntos de interés durante las inspecciones.
- **Anotaciones y Comentarios:** Algunas cámaras termográficas permiten agregar anotaciones y comentarios directamente en la imagen térmica para proporcionar información adicional o describir hallazgos relevantes durante la inspección.
- **Conectividad y Transferencia de Datos:** Las cámaras termográficas modernas pueden estar equipadas con interfaces de conectividad, como Wi-Fi o Bluetooth, que permiten transferir datos e imágenes a dispositivos móviles o computadoras para un análisis más detallado o un reporte inmediato.
- **El gradiente térmico:** Indica la variación gradual de la temperatura del cuerpo con la distancia o la superficie en la que se podrá ver el sentido del flujo de calor mediante el cambio de los colores que aparecen en la escala. Los gradientes térmicos casi siempre revelan problemas importantes y es el más típico de los patrones que se encontrarán, bien sea en la localización de humedades, problemas eléctricos, puentes térmicos, etc.

- **Perfil de temperatura:** Permite ver la evolución de la temperatura a lo largo de una recta trazada en una imagen. Concretamente, el resultado es una gráfica con la temperatura en el *eje vertical* y la distancia en el *eje horizontal*.

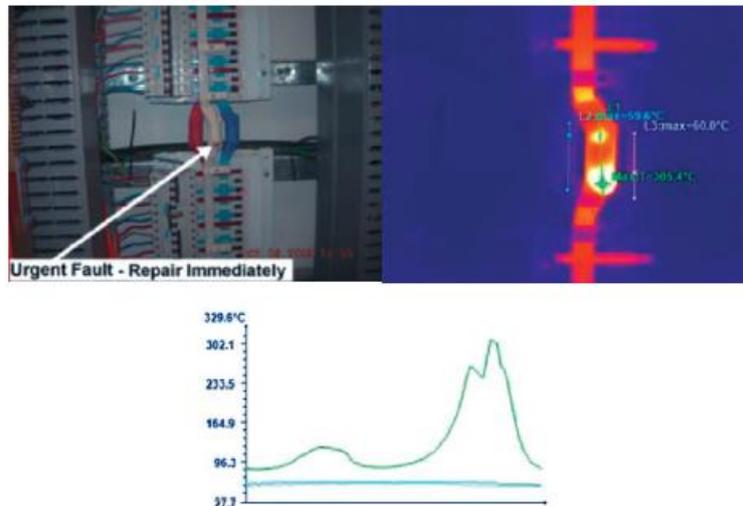


Figura 2.4.4: Perfil de temperatura de la imagen infrarroja de un contactor térmico. [11]

- **Video:** El uso de video en la cámara termográfica resulta ser una herramienta valiosa para diversas aplicaciones avanzadas de termografía. Se pueden distinguir dos tipos principales de video:
  - **Video IR:** Consiste en secuencias de imágenes infrarrojas en formato de video digital estándar. Esta función es útil para visualizar y observar de manera dinámica el comportamiento térmico de objetos o sistemas en movimiento. Sin embargo, debido a las limitaciones del formato de video estándar, no se puede realizar un análisis cuantitativo preciso sobre las mediciones térmicas obtenidas a través de esta función. Por lo tanto, su uso está más enfocado en obtener información cualitativa sobre la distribución térmica y el comportamiento térmico general del objeto o sistema.
  - **Video Radiométrico IR:** Este tipo de video consiste en secuencias de imágenes infrarrojas con valores de medida en cada píxel, incorporando datos cuantitativos sobre la temperatura en cada punto de la imagen. A diferencia del video IR estándar, el video radiométrico IR permite realizar un análisis cuantitativo mucho más profesional y preciso. Con esta funcionalidad, es posible medir y visualizar los valores de temperatura

en tiempo real y posteriormente realizar un análisis detallado de la evolución térmica en un objeto o sistema a lo largo del tiempo. Esto es especialmente útil para estudiar la inercia térmica de un edificio, detectar picos de consumo en el arranque de equipos eléctricos o realizar análisis de procesos térmicos en tiempo real.

○ FUSIÓN TÉRMICA Y PICTURE IN PICTURE

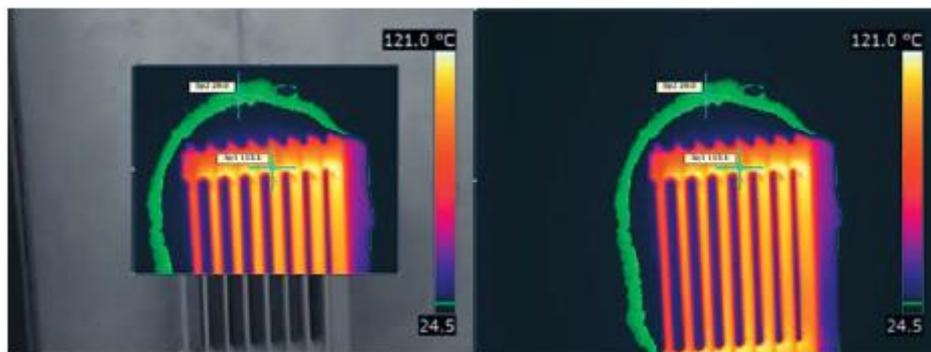


Figura 2.4.5: Fusión térmica y “Picture In Picture” de un radiador. [12]

Permite incluir la imagen real en la imagen térmica (Figura 2.4.5: Fusión térmica y “Picture In Picture” de un radiador. ) para facilitar la identificación del objeto bajo estudio. También permite resaltar sobre la imagen real un intervalo de temperatura que se quiera resaltar.

## 2.4.4 REFLEXIONES EN LA MEDICIÓN TERMOGRÁFICA

Durante la medición termográfica, las reflexiones pueden ser una fuente de confusión e interferencia en las imágenes térmicas. Es fundamental tomar medidas para evitar o minimizar estas reflexiones y obtener mediciones precisas y confiables. A continuación, se presentan algunas recomendaciones para abordar este problema:

- **Evitar Ser Uno Mismo el Reflejo:** El termógrafo debe evitar situarse inmediatamente delante del objeto de medida, ya que podría reflejar su propia radiación térmica. Si esto es inevitable, el termógrafo debe moverse para determinar si su propio calor corporal está generando reflexiones en la imagen. Si el "punto caliente" se mueve con el operario, es probable que se trate de una reflexión de la radiación emitida por su cuerpo.

- **Apantallar Fuentes de Reflexión:** Es recomendable utilizar un cartón u otro material adecuado para apantallar las fuentes de reflexión presentes en el entorno. Esto ayuda a minimizar la interferencia de objetos o superficies que puedan estar reflejando radiación infrarroja en el objeto de medida.
- **Emisividad Alta en Partes del Objeto:** Cuando sea posible, se debe intentar medir partes del objeto que tengan una emisividad alta, ya que estas superficies reflejarán menos radiación y sus temperaturas serán más cercanas a las reales. Esto es especialmente útil cuando se sospecha que algunas partes del objeto puedan generar reflexiones significativas.
- **Metales Pulidos como Espejos Térmicos:** Los metales pulidos actúan como espejos térmicos y pueden reflejar la radiación infrarroja de manera muy eficiente. Se debe tener en cuenta este factor al medir objetos con superficies metálicas brillantes y tomar medidas para evitar reflexiones no deseadas.
- **Ángulos de Incidencia y Salida en Reflexiones:** En los reflejos, los ángulos de incidencia son iguales a los de salida. Conociendo este principio, se puede evitar la fuente del reflejo mediante un ajuste en la posición del termógrafo o del objeto de medida.
- **Lente de la Cámara en Germanio:** La lente de la cámara termográfica está construida en germanio, lo que evita la reflexión de radiación en la propia lente y mejora la calidad de las imágenes térmicas.

Al prestar atención a estos puntos y tomar las precauciones necesarias, se puede minimizar la interferencia causada por las reflexiones en la medición termográfica y obtener resultados más precisos y fiables en la interpretación de las imágenes térmicas.

## 2.4.5 EMISIÓN, REFLEXIÓN, TRANSMISIÓN

La radiación registrada por la cámara termográfica consiste en la radiación de onda larga emitida, reflejada y transmitida que surge de los objetos presentes en el campo de visión de la cámara.

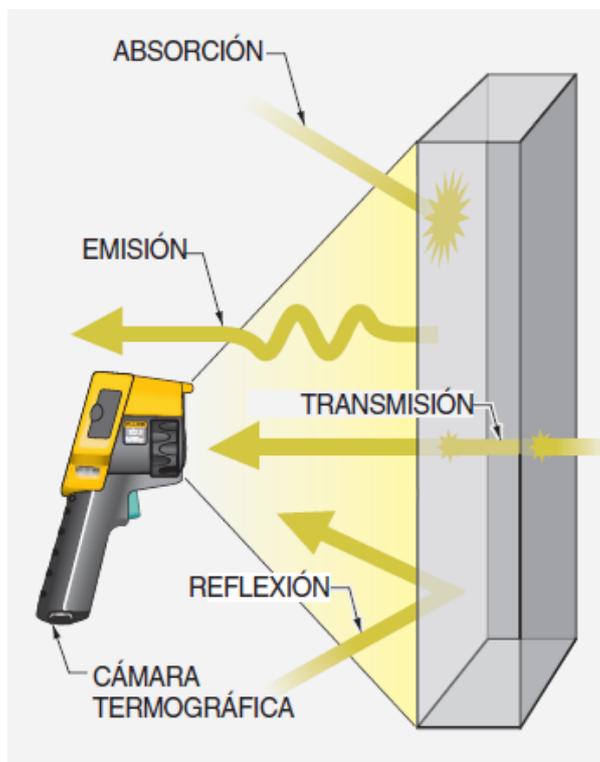


Figura 2.4.6 Emisividad, transmisión y reflexión [13]

### 2.4.5.1 EMISIVIDAD ( $\epsilon$ )

La emisividad (" $\epsilon$ ") es un factor cuantificador de la capacidad que un material tiene para emitir o propagar radiación infrarroja. Es un parámetro esencial en la termografía, ya que influye directamente en la precisión y exactitud de las mediciones de temperatura realizadas por una cámara termográfica. A medida que la radiación infrarroja proviene de la superficie del objeto o la escena inspeccionada, la emisividad determina cuánta energía infrarroja será emitida en función de la temperatura real del objeto.

La  $\epsilon$  depende directamente de varias variables, incluyendo las propiedades de la superficie del objeto medido, el material del que está compuesta dicha superficie y, en algunos casos, la temperatura de la superficie. La emisividad máxima teórica es " $\epsilon = 1$ " (" $\epsilon = 100\%$ "), lo que indicaría un emisor perfecto que emite toda la energía infrarroja que llega a su superficie. Sin embargo, en la práctica, los cuerpos negros reales tienen una " $\epsilon < 1$ " (" $\epsilon < 100\%$ ") debido a que no son emisores perfectos y transmiten y/o reflejan parte de la radiación del entorno.

La " $\epsilon$ " puede variar ampliamente según el tipo de material y la condición superficial del objeto o la superficie inspeccionada. Algunos materiales no metálicos, como plásticos, cerámicas o materiales compuestos, suelen tener una emisividad relativamente alta y constante en el rango infrarrojo de onda larga, lo que simplifica el proceso de medición de temperatura. Por el contrario, los materiales metálicos y superficies brillantes, especialmente aquellos con superficies pulidas, pueden tener una baja emisividad que se modifica con la temperatura.

Para obtener mediciones térmicas precisas, es fundamental que el termógrafo ajuste adecuadamente la emisividad en la cámara termográfica según las características del objeto o la superficie que se va a inspeccionar. Si la emisividad se establece incorrectamente, las mediciones de temperatura pueden ser inexactas, lo que lleva a interpretaciones erróneas o decisiones equivocadas.

En algunos casos, la emisividad del material puede obtenerse de tablas y bases de datos específicas que proporcionan valores típicos de emisividad para diferentes materiales. Sin embargo, para asegurar la máxima precisión, se recomienda que el termógrafo realice mediciones in situ para obtener valores más precisos de emisividad del objeto en cuestión. Esto puede realizarse utilizando fuentes de referencia conocidas con temperaturas bien definidas y comparando las mediciones de la cámara con termómetros de referencia calibrados.

Es importante destacar que la emisividad puede cambiar con el estado superficial del objeto o la presencia de recubrimientos o pinturas. Por lo tanto, en inspecciones donde se examinan diferentes materiales o condiciones superficiales, es necesario ajustar la emisividad en función de cada caso específico.

#### 2.4.5.2 REFLEXIÓN( $\rho$ )

El coeficiente de reflexión (" $\rho$ ") es un factor cuantificador de la capacidad que un material tiene para reflejar la radiación infrarroja. Este coeficiente depende de varias características del objeto o superficie medidos, incluyendo sus propiedades, el material del que está compuesta y la temperatura de la superficie. Usualmente, las superficies lisas o pulidas tienden a reflejar la radiación en mayor grado que las superficies irregulares o sin pulir.

Es importante mencionar que  $\rho$  es una variable configurable manualmente en todas las cámaras termográficas (RTC). Al ajustar este valor, se puede adaptar la interpretación de la radiación reflejada

por diferentes materiales, lo que resulta particularmente relevante al inspeccionar objetos con superficies reflectantes o con diferentes características de reflexión.

La relación entre el coeficiente de reflexión (" $\rho$ ") y la emisividad (" $\varepsilon$ ") es fundamental para obtener mediciones precisas. Mientras  $\varepsilon$  se refiere a la capacidad del material para emitir radiación térmica propia,  $\rho$  se relaciona con su capacidad para reflejar la radiación incidente proveniente del entorno.

En las aplicaciones termográficas, es crucial tener en cuenta ambos factores y configurar adecuadamente los valores de  $\varepsilon$  y  $\rho$  para cada material o superficie que se vaya a inspeccionar. De esta manera, se asegura una interpretación precisa de las temperaturas obtenidas y se minimiza cualquier influencia de la reflexión de la radiación en los resultados termográficos.

Es recomendable seguir las pautas del fabricante de la cámara termográfica y realizar calibraciones y verificaciones periódicas para garantizar que los valores de  $\varepsilon$  y  $\rho$  sean correctamente considerados en las mediciones. Asimismo, esto asegura que la cámara funcione con la máxima precisión posible en diferentes escenarios y aplicaciones, brindando resultados confiables y útiles para una amplia gama de tareas de inspección y análisis termográfico.

### 2.4.5.3 TRANSMISIÓN ( $\tau$ )

La transmisión (" $\tau$ ") es un factor cuantificador de la capacidad de un material para permitir el paso de la radiación infrarroja a través de él. Este coeficiente depende de varias características del objeto o superficie medidos, incluyendo el material del que está compuesta y el grosor del material.

Es importante destacar que muchos materiales son impermeables a la radiación infrarroja de onda larga, lo que significa que no permiten el paso de la radiación a través de ellos. Estos materiales se comportan como barreras a la radiación infrarroja, lo que puede tener implicaciones significativas en aplicaciones termográficas, especialmente en aquellas donde se necesita penetrar a través de ciertos materiales para realizar inspecciones o mediciones de temperatura.

La transmisión (" $\tau$ ") se relaciona directamente con la capacidad de la radiación infrarroja para atravesar diferentes materiales, y su valor puede variar significativamente según las propiedades ópticas y estructurales del material. Es importante tener en cuenta este factor al seleccionar la cámara termográfica adecuada para una aplicación específica, ya que la transmisión de la radiación puede afectar la capacidad de la cámara para capturar imágenes o mediciones precisas a través de ciertos materiales.

En algunas situaciones, es posible que se requieran cámaras termográficas con capacidades especiales, como la capacidad de penetrar ciertos materiales opacos, para lograr una inspección termográfica completa y precisa. La elección de la cámara adecuada dependerá de las necesidades específicas de la aplicación y de las características del objeto o superficie que se vaya a inspeccionar.

Como con los coeficientes de emisividad (" $\epsilon$ ") y reflexión (" $\rho$ "), es fundamental configurar adecuadamente el valor de la transmisión (" $\tau$ ") en la cámara termográfica para garantizar mediciones precisas y resultados confiables en diferentes escenarios y aplicaciones termográficas. La comprensión de la transmisión y su influencia en las mediciones es esencial para utilizar la termografía de manera efectiva y obtener información valiosa en una amplia variedad de campos, como la industria, la investigación, el mantenimiento y la seguridad, entre otros.

#### 2.4.5.4 LEY DE LA RADIACIÓN DE KIRCHOFFS

La Ley de Radiación de Kirchhoff establece que la suma de los factores de emisividad (" $\epsilon$ "), reflexión (" $\rho$ ") y transmisión (" $\tau$ ") de un objeto medido siempre es igual a 1 (100%). En la radiación infrarroja captada por una cámara termográfica, se consideran tres componentes principales:

1. **La radiación que el objeto medido emite:** Esta es la radiación infrarroja que el objeto emite debido a su temperatura. La cantidad de radiación emitida está directamente relacionada con la temperatura del objeto y su emisividad.
2. **La reflexión de la radiación ambiente:** Los objetos no solo emiten radiación, sino que también reflejan la radiación del entorno que incide sobre ellos. La cantidad de radiación reflejada depende de la emisividad del objeto y de las propiedades de su superficie, como su color y textura.
3. **La transmisión de radiación del objeto medido:** Algunos materiales permiten que la radiación infrarroja pase a través de ellos, lo que se conoce como transmisión. Sin embargo, en muchas aplicaciones de termografía, esta transmisión es insignificante, y se considera como una variable prácticamente nula en la fórmula debido a que la radiación no atraviesa fácilmente la mayoría de los materiales.

Dado que, en la mayoría de las aplicaciones reales, el factor de transmisión (" $\tau$ ") es mucho menor que los de emisividad (" $\epsilon$ ") y reflexión (" $\rho$ ") (" $\tau \ll \epsilon \approx \rho$ "), este término se omite en la fórmula anterior:

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (2.24)$$

Esta simplificación implica que, a menor emisividad del objeto medido, mayor será la proporción de radiación infrarroja reflejada y menor será la radiación emitida. Esto puede resultar en una mayor dificultad para realizar mediciones precisas de temperatura, ya que la cámara termográfica recibirá menos radiación infrarroja directa del objeto. Por lo tanto, en escenarios con baja emisividad, es crucial una correcta configuración de la compensación de la temperatura reflejada (RTC) para obtener mediciones más confiables.

La Ley de Radiación de Kirchhoff es fundamental para entender cómo interactúan los diferentes factores en la captación de radiación infrarroja y cómo influyen en las mediciones termográficas. Tener en cuenta estos principios ayuda a los usuarios a interpretar adecuadamente las imágenes termográficas y a realizar mediciones precisas en diversas situaciones y aplicaciones.

#### 2.4.5.5 CORRELACIÓN ENTRE EMISIÓN Y REFLEXIÓN

- **Medición de objetos con emisividad elevada (" $\varepsilon \geq 0.8$ ):** La medición de objetos con alta emisividad, donde  $\varepsilon$  es mayor o igual a 0.8, presenta un factor de reflexión bajo ( $\rho$ ).vEsto significa que la cantidad de radiación infrarroja reflejada por estos objetos es relativamente baja, lo que permite medir la temperatura de forma muy fácil y precisa utilizando una cámara termográfica. En este rango de emisividad, la mayoría de la radiación infrarroja emitida por el objeto es detectada directamente por la cámara, lo que facilita la obtención de mediciones termográficas confiables y precisas.
- **Medición de objetos con emisividad media ( $0.6 < \varepsilon < 0.8$ ):** Para objetos con una emisividad media, donde  $0.6 < \varepsilon < 0.8$ , el factor de reflexión ( $\rho$ ) es de nivel medio. En este caso, la cantidad de radiación infrarroja reflejada es moderada, lo que permite medir la temperatura de manera relativamente fácil con la cámara termográfica. Sin embargo, debido a la emisividad ligeramente menor, es importante tener en cuenta la influencia de la radiación reflejada en las mediciones y aplicar las correcciones adecuadas para obtener resultados precisos.
- **Medición de objetos con emisividad baja (" $\varepsilon \leq 0.6$ ):** Cuando se mide objetos con baja emisividad, donde  $\varepsilon$  es menor o igual a 0.6, el factor de reflexión ( $\rho$ ) es alto. En esta situación, una cantidad significativa de radiación infrarroja es reflejada por el objeto, lo que puede afectar las mediciones de temperatura obtenidas con la cámara termográfica. Por lo tanto, las

temperaturas medidas en este rango de emisividad deben tratarse con cautela y es crucial realizar un ajuste adecuado de la compensación de la temperatura reflejada (RTC). Aplicar esta corrección es esencial para obtener mediciones más precisas y confiables, ya que compensa la influencia de la radiación reflejada en las imágenes termográficas.

La consideración de la emisividad y el factor de reflexión es esencial al realizar mediciones termográficas precisas y comprender cómo afectan a las imágenes capturadas por la cámara. Al conocer estos factores y aplicar las correcciones adecuadas según el rango de emisividad del objeto medido, se pueden obtener resultados más fiables en diversas aplicaciones de termografía.

La verificación del correcto ajuste de emisividad es especialmente importante cuando las diferencias en temperatura entre el objeto medido y el entorno son notables:

- En el caso de que la temperatura del objeto medido sea superior a la temperatura ambiente (el radiador de la [Figura 2.4.7](#)):
  - Un ajuste de la emisividad demasiado alto resulta en unas lecturas de temperatura demasiado bajas (cámara 2).
  - Un ajuste de la emisividad demasiado bajo resulta en unas lecturas de temperatura demasiado altas (cámara 1).
- En el caso de que la temperatura del objeto medido sea inferior a la temperatura ambiente (la puerta de la [Figura 2.4.7](#)):
  - Un ajuste de la emisividad demasiado alto resulta en unas lecturas de temperatura demasiado altas (cámara 2).
  - Un ajuste de la emisividad demasiado bajo resulta en unas lecturas de temperatura demasiado bajas (cámara 1).

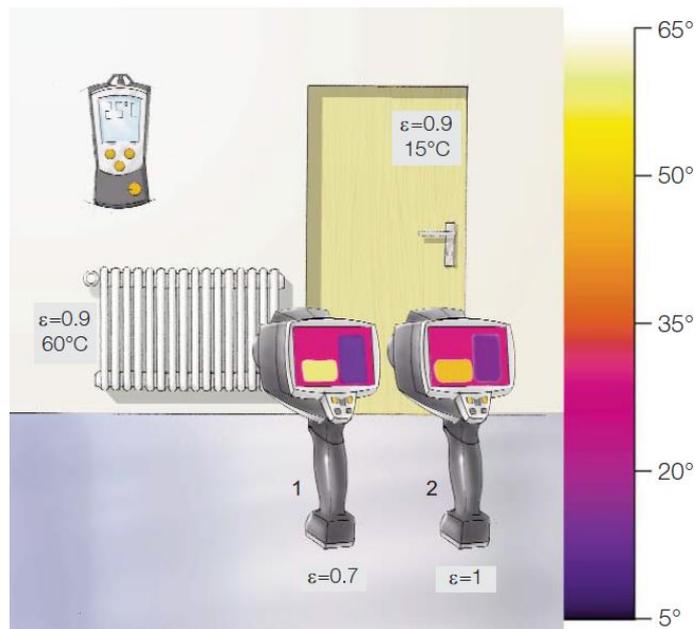


Figura 2.4.7: Efectos de un ajuste de emisividad incorrecto en la medición de temperatura. [14]

## 2.4.5.6 CONSIDERACIONES Y LIMITACIONES EN LA MEDICIÓN TERMOGRÁFICA

La medición termográfica es una herramienta poderosa para obtener información sobre la distribución de temperaturas en objetos y superficies. Sin embargo, es esencial tener en cuenta ciertas consideraciones y limitaciones para garantizar mediciones precisas y comprender el impacto de diferentes factores en las imágenes capturadas por la cámara.

- 1. Efecto de la Emisividad:** La emisividad (" $\epsilon$ ") de un material es un factor crucial en la medición termográfica, ya que cuantifica su capacidad para emitir radiación infrarroja. A medida que aumenta la diferencia entre la temperatura del objeto medido y la del entorno, el número de errores de medición también aumenta. Estos errores se amplifican especialmente cuando la emisividad disminuye, lo cual es especialmente importante si el ajuste de emisividad no es adecuado. Por lo tanto, es imprescindible considerar cuidadosamente la emisividad del objeto en estudio y realizar los ajustes necesarios para obtener mediciones precisas.
- 2. Limitación en la Medición de la Temperatura Interna:** La cámara termográfica permite medir las temperaturas superficiales de los objetos, pero no puede proporcionar información sobre la temperatura interna de los mismos. Si existen elementos bajo la superficie del objeto

que afectan el perfil de distribución de calor por conducción, estos pueden ser detectados en la termografía, pero no se podrá conocer con exactitud la distribución real de las temperaturas en dichos elementos subsuperficiales.

3. **Influencia de Materiales Transparentes y Opacos:** Algunos materiales, como el cristal, son transparentes al ojo humano, lo que permite el paso de radiación en el espectro visible. Sin embargo, no son permeables a la radiación infrarroja captada por las cámaras termográficas. Por lo tanto, no es posible medir las superficies de objetos que se encuentran tras películas de estos materiales. Algunas delgadas láminas de plástico y el germanio son ejemplos de materiales transmisores de radiación infrarroja de onda larga, a través de los cuales se pueden realizar termografías. Es importante tener en cuenta la naturaleza de los materiales en la escena de medición para evitar interpretaciones erróneas.
4. **Consideración del Embalaje o Envoltorio:** Si se desea medir la temperatura de un objeto que está envuelto o empaquetado con otro material, es necesario retirar el embalaje antes de realizar la medición. De lo contrario, se estará midiendo la temperatura de la superficie del embalaje o envoltorio en lugar de la del cuerpo en cuestión. La eliminación adecuada del embalaje garantiza mediciones precisas y fiables de la temperatura real del objeto.

La medición termográfica ofrece una amplia gama de aplicaciones y beneficios en diversos campos. Sin embargo, es fundamental comprender las limitaciones asociadas y considerar factores como la emisividad, la transparencia de los materiales y la eliminación del embalaje para obtener mediciones precisas y confiables. Al abordar estas consideraciones, los usuarios de cámaras termográficas pueden maximizar su eficacia y obtener resultados más precisos y significativos en sus inspecciones y análisis termográficos.

## 2.4.6 DISTANCIA DE MEDICIÓN Y TAMAÑO DEL OBJETO

Para realizar mediciones precisas en termografía y comprender la visibilidad y medición de objetos en las imágenes capturadas, es fundamental tener en cuenta tres variables clave:

- 1) **Campo de Visión (FOV):** El campo de visión (FOV) representa el ángulo horizontal visible a través de la lente de infrarrojos de la cámara termográfica. Esta medida determina el área o región de la escena que será capturada por la cámara y se mostrará en la imagen termográfica.

El ángulo de visión del FOV es determinado por el objetivo utilizado, pudiendo emplearse objetivos de tipo angular para campos de visión amplios.

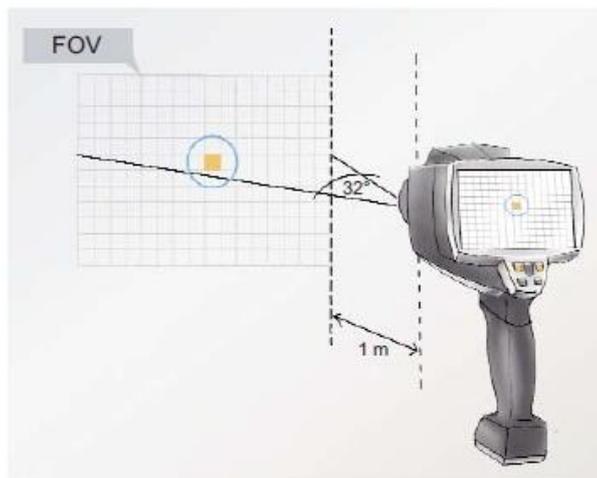


Figura 2.4.8 Ángulo de visión de la cámara termográfica. [14]

- 2) **Objeto Identificable Más Pequeño ( $IFOV_{geo}$ ):** El  $IFOV_{geo}$  representa el tamaño del objeto identificable más pequeño en función de la distancia de medición. Se refiere al tamaño de un píxel en la imagen termográfica y es calculado mediante la resolución espacial del objetivo y la distancia de medición. Por ejemplo, con una resolución espacial del objetivo de 3,5 mrad y una distancia de medición de 1 metro, el objeto identificable más pequeño ( $IFOV_{geo}$ ) tendrá un tamaño de 3,5 mm y se mostrará en la pantalla como un píxel.
- 3) **Objeto Medible/Marca de Medición Más Pequeña ( $IFOV_{meas}$ ):** El  $IFOV_{meas}$  es otra variable importante que influye en la precisión de las mediciones. Representa el tamaño mínimo del objeto medible o la marca de medición en la imagen termográfica y también depende de la resolución espacial del objetivo y la distancia de medición.

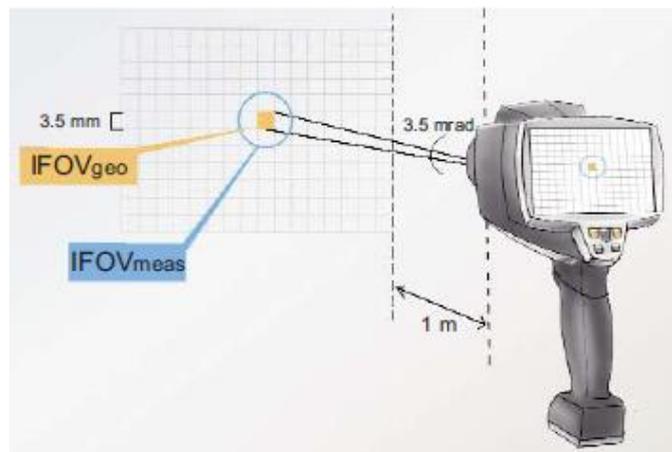


Figura 2.4.9 Ángulo de visión de un píxel. [14]

Es esencial considerar estas variables al seleccionar una cámara termográfica adecuada para una aplicación específica, ya que influyen en la precisión y el alcance de las mediciones realizadas. Para medir con precisión, el objeto a medir debe ser entre 2 y 3 veces más grande que el objeto identificable más pequeño ( $IFOV_{geo}$ ). Como aproximación estimada, el objeto medible más pequeño ( $IFOV_{meas}$ ) puede calcularse como " $IFOV_{meas} \approx 3 \times IFOV_{geo}$ ". Estas consideraciones permiten obtener mediciones confiables y resultados precisos en la termografía.

Es importante destacar que el ángulo de visión del FOV de la cámara termográfica también puede afectar la distancia de medición óptima y el tamaño máximo del objeto que puede ser visible o medible en la imagen termográfica. Con un FOV más amplio, se puede capturar una mayor área de la escena, pero la resolución espacial y la precisión pueden disminuir a medida que el objeto de interés se aleja de la cámara.

Además, al establecer la distancia de medición óptima, se debe considerar el rango dinámico de la cámara, la emisividad del objeto, y las condiciones ambientales, ya que todos estos factores pueden influir en la calidad de las mediciones termográficas. Por tanto, es recomendable realizar pruebas y calibraciones antes de llevar a cabo una inspección termográfica crítica o en entornos con condiciones particulares.

---

## 3 Guía de buenas prácticas

---

### 3.1 EL OBJETO MEDIDO

El objeto medido es uno de los elementos fundamentales en una inspección termográfica, ya que su material y emisividad determinan la cantidad de radiación infrarroja emitida y reflejada desde su superficie. La emisividad es una característica específica de cada material y se refiere a la capacidad del objeto para emitir radiación infrarroja.

- **Material y emisividad:** Cada material tiene una emisividad característica, que determina la cantidad de radiación infrarroja emitida por el objeto. Esta radiación se divide en dos componentes: la radiación reflejada, que proviene de fuentes externas y no es absorbida por el objeto, y la radiación emitida, que es irradiada directamente desde la superficie del objeto.
- **Color:** El color del material no tiene un efecto significativo en la radiación infrarroja de onda larga emitida por el objeto medido con una cámara termográfica. Sin embargo, las superficies oscuras tienden a absorber más radiación infrarroja de onda corta que las superficies claras, lo que resulta en un calentamiento más rápido. Es importante destacar que la cantidad de radiación infrarroja emitida depende de la temperatura del objeto y no de su color. En otras palabras, dos cuerpos del mismo material y a la misma temperatura emitirán la misma cantidad de radiación infrarroja, independientemente de su color. Sin embargo, el color sí influye en la temperatura del objeto bajo ciertas condiciones externas, lo que afecta la cantidad de radiación emitida.
- **Superficie:** Las propiedades de la superficie del objeto a medir tienen un papel fundamental en la medición de temperatura por medio de una cámara termográfica, ya que la emisividad de esta varía en función de su estructura, su recubrimiento o su pulcritud.
  - **Estructura de la superficie:** En términos generales, se observa que las superficies lisas, brillantes, reflectantes o pulidas tienen una emisividad más baja en comparación con las superficies mate, cuarteadas, rugosas, erosionadas o rayadas del mismo material. Es importante tener en cuenta que en superficies extremadamente lisas, es común que ocurran reflejos especulares.

- **Humedad, nieve y escarcha en la superficie:** El agua, la nieve y la escarcha exhiben emisividades relativamente altas, con valores aproximados entre 0.85 y 0.96, lo que permite realizar mediciones sin dificultades. Cabe mencionar que la presencia de humedad puede enfriar la superficie del objeto debido a la evaporación, mientras que la nieve actúa como un buen aislante térmico. En el caso específico de la escarcha, generalmente no forma una capa aislante, por lo que es necesario considerar tanto la emisividad de la escarcha como la de la superficie debajo de esta durante el proceso de medición.
- **Suciedad y partículas en la superficie:** La presencia de suciedad en la superficie del objeto a medir, como polvo, hollín o lubricante, suele resultar en un aumento de la emisividad en dicha área. Esto implica que la medición de objetos con manchas no suele presentar problemas significativos. No obstante, es fundamental tener en cuenta que la cámara termográfica siempre registra la temperatura de la superficie externa, es decir, la temperatura de la suciedad presente, y no la temperatura exacta de la superficie del objeto que se encuentra debajo de estas partículas. Por lo tanto, al interpretar las imágenes termográficas y analizar los datos, es esencial considerar el posible impacto de la suciedad en los resultados obtenidos para obtener una evaluación precisa de la temperatura real del objeto de interés.
- **Recomendaciones:**
  - Es importante tener en cuenta que el número de errores de medición aumenta a medida que crece la diferencia entre la temperatura del objeto a medir y la del entorno. Estos errores de medición se amplifican aún más si la emisividad no está correctamente ajustada, especialmente en situaciones donde la emisividad disminuye.
  - Es fundamental comprender que una cámara termográfica solo puede medir las temperaturas superficiales de los objetos, por lo que no se debe intentar medir temperaturas interiores. Aunque la termografía puede detectar elementos subsuperficiales que afecten el perfil de distribución de calor por conducción, no proporcionará una visión precisa de la distribución real de temperaturas en dichos elementos internos.

- Cuando se desee medir la temperatura de un objeto que esté embalado o envuelto en otro material, es crucial retirar el embalaje o envoltorio antes de realizar la medición. De lo contrario, se estaría midiendo la temperatura de la superficie del embalaje o envoltorio en lugar de la temperatura real del objeto en cuestión.

## 3.2 EL ENTORNO DEL OBJETO MEDIDO

La medición precisa de la temperatura de un objeto mediante termografía infrarroja requiere tener en cuenta diversas condiciones ambientales y factores que pueden afectar los resultados. A continuación, se describen los aspectos más relevantes relacionados con el entorno del objeto medido:

- **Temperatura ambiente:** La temperatura ambiente es un factor crítico que afecta las mediciones por termografía. Es fundamental ajustar adecuadamente los parámetros de temperatura reflejada (RTC) y emisividad ( $\epsilon$ ) en la cámara termográfica para obtener mediciones precisas. En aplicaciones donde la temperatura reflejada es similar a la temperatura ambiente, se debe prestar especial atención a configurar correctamente la emisividad, especialmente cuando hay una gran diferencia de temperatura entre el objeto y el entorno.
- **Radiación:** Todos los objetos con una temperatura superior al cero absoluto emiten radiación infrarroja. Cuando se realiza una medición por infrarrojos, es importante considerar que los objetos circundantes con temperaturas significativamente diferentes al objeto a medir pueden afectar la medición debido a su propia radiación infrarroja. Para minimizar estos efectos de interferencia, se recomienda apantallar las fuentes de radiación cercanas al objeto objetivo. En casos en que no sea posible reducir estos efectos negativos de la radiación, es necesario tener en cuenta que la temperatura reflejada no siempre coincide con la temperatura ambiente. Para medir la radiación reflejada, se pueden emplear herramientas adicionales como un termómetro de globo o un radiador Lambert.
- **Meteorología:**
  - **Nubes:** Las mediciones exteriores son más confiables en días nublados, ya que la presencia de nubes minimiza el efecto de la radiación solar sobre los objetos, reduciendo así la interferencia en las mediciones.

- **Precipitaciones:** Las precipitaciones fuertes, como lluvia, hielo o nieve, pueden alterar significativamente los resultados de las mediciones termográficas. Estos materiales tienen una alta emisividad y son impermeables a la radiación infrarroja, lo que impide mostrar con precisión los perfiles de temperatura de la superficie deseada. Cuando el objeto está mojado, la termografía indicará una temperatura mayor a la real, ya que el objeto transferirá calor al agua en su superficie mientras esta se evapora.
- **El sol:** La presencia directa del sol puede afectar las mediciones por termografía, especialmente en exteriores. La radiación solar puede calentar los objetos y afectar las temperaturas superficiales, lo que puede generar errores en las mediciones. En aplicaciones al aire libre, se debe evitar que el sol incida directamente sobre el objeto a medir para obtener mediciones más precisas.
- **El ambiente:**
  - **Humedad ambiente:** La humedad relativa del ambiente tiene que ser la mínima posible o al menos suficientemente baja para que no haya condensación de vapor de agua en el aire (neblina) ni en la superficie del objeto (vaho), en el filtro de protección, objetivo de la cámara, etc. En el caso de que la lente de la cámara se encuentre cubierto de vaho, parte de la radiación infrarroja que llega a la cámara se pierde porque no es capaz de penetrar a través de la cámara presente en lente. En el caso de nieblas en el medio de transmisión de la radiación (el propio aire) el rocío bloquea parcialmente los rayos infrarrojos provenientes del objeto a medir.
  - **Corrientes de aire:** Cualquier flujo de aire en el entorno de medición afecta la temperatura medida por la cámara termográfica debido a la transmisión de calor por convección. En condiciones de equilibrio térmico, el aire en contacto con la superficie del objeto y la propia superficie tienen la misma temperatura. Sin embargo, cuando hay corrientes de aire, la capa de aire en contacto con la superficie del objeto se reemplaza por otra con una temperatura diferente, lo que lleva a un período de tiempo en el cual se producen transferencias de calor hasta alcanzar un nuevo equilibrio térmico. El efecto de intercambio de calor se incrementa cuando hay una mayor diferencia de temperatura entre la superficie del objeto y la temperatura ambiente.

- **Polución:** Las partículas en suspensión, como polvo, hollín, humo, entre otros, tienen una alta emisividad y una transmisión muy baja, lo que puede opacar la superficie del objeto en el espectro infrarrojo. Las cámaras termográficas captan la radiación de estas partículas y solo parcialmente la radiación emitida por el objeto que se desea medir. Otra parte de la radiación infrarroja emitida por el objeto es absorbida por las partículas en suspensión.
- **La luz:** La luz visible no afecta significativamente las mediciones con la cámara termográfica. Sin embargo, se recomienda evitar fuentes de luz directa, ya que emiten radiación infrarroja que puede aumentar la temperatura de los objetos. Si se desea realizar mediciones con buenas condiciones de visibilidad y evitar posibles problemas, es aconsejable utilizar luces frías, como LEDs o neones, que transforman el 100% de la corriente suministrada en luz visible.
- **Recomendaciones:**
  - **Realizar las mediciones con el cielo nublado:** En la medida de lo posible, se debe llevar a cabo la termografía con el cielo nublado, ya que las condiciones ideales para mediciones exteriores se dan en días nublados. La capa de nubes minimiza el efecto de la radiación solar sobre los objetos, lo que ayuda a obtener mediciones más precisas y confiables.
  - **Evitar cualquier precipitación fuerte durante la medición:** Las precipitaciones fuertes, como lluvia intensa o nevadas abundantes, pueden alterar severamente los resultados de las mediciones termográficas. El agua, el hielo y la nieve tienen una elevada emisividad y son impermeables a la radiación infrarroja, lo que afecta la obtención de perfiles de temperatura precisos en la superficie deseada.
  - **No medir nunca en niebla densa o vapor de agua:** Las mediciones en condiciones de niebla densa o presencia de vapor de agua deben evitarse, ya que estos elementos afectan la transmisión de radiación infrarroja y pueden comprometer la precisión de las mediciones termográficas.
  - **No medir si la humedad ambiente condensa en la lente de la cámara:** La condensación de humedad en la lente de la cámara termográfica puede distorsionar las mediciones y afectar negativamente la calidad de las imágenes térmicas. Es importante asegurarse de que la lente esté libre de condensación antes de realizar las mediciones.

- **Evitar cualquier corriente de aire en la medida si es posible.** En caso contrario, tener en cuenta la velocidad y dirección de las corrientes de aire: Las corrientes de aire pueden afectar las mediciones de temperatura debido a la transmisión de calor por convección. Se debe evitar la presencia de corrientes de aire en la medida de lo posible. Si no es posible evitarlas, es importante considerar la velocidad y dirección de las corrientes de aire para tener en cuenta su influencia en las mediciones.
- **No medir en aire sucio:** Las partículas en suspensión en el aire, como polvo, hollín o humo, pueden tener una alta emisividad y baja transmisión, lo que afecta la calidad de las mediciones termográficas. Es importante evitar medir en ambientes con aire sucio para obtener resultados más precisos.
- **Medir a la menor distancia posible para minimizar los efectos de posibles materias suspendidas en el aire:** Al medir a una distancia cercana al objeto, se reduce la influencia de posibles partículas suspendidas en el aire, lo que mejora la calidad de las mediciones termográficas.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE LA TERMOGRAFÍA EN EXTERIORES

La radiación infrarroja emitida en un día despejado se conoce coloquialmente como "radiación celestial fría difusa". Cuando el cielo está despejado, esta radiación ( $\sim -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y la luz del sol ( $\sim 5500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) se reflejan durante el día. Aunque la temperatura del sol es significativamente más alta que la radiación celestial, el área del cielo es mucho mayor que la del sol, lo que significa que la temperatura reflejada en la termografía en exteriores siempre estará por debajo de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , incluso en días soleados.

Los objetos pueden cambiar su temperatura superficial al almacenar calor después de estar expuestos al sol durante horas debido a la absorción de los rayos solares. En la Figura 3.3.1, la imagen térmica muestra que el canalón está más frío que la pared de la casa, aunque ambos objetos están aproximadamente a la misma temperatura. Esto se debe a que se debe tener en cuenta la imagen termográfica y considerar estos factores para una correcta interpretación.

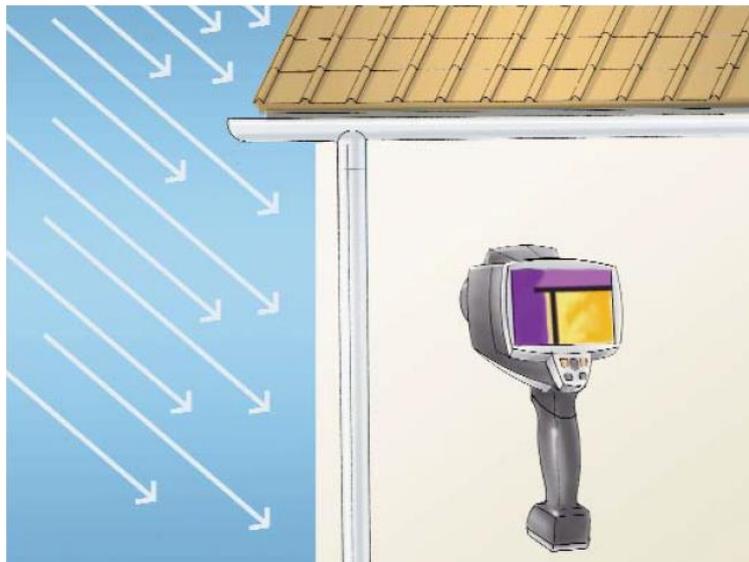


Figura 3.3.1: Reflexión para mediciones exteriores. [14]

En el caso mencionado, se asume que la superficie del canalón es de acero galvanizado, lo que implica que su emisividad es muy baja ( $\epsilon = 0.1$ ). Esto significa que solo el 10% de la radiación infrarroja en onda larga emitida es inherente al canalón, mientras que el 90% es radiación reflejada del ambiente.

Cuando el cielo está despejado, la "radiación celestial difusa fría" ( $\sim -60\text{ }^\circ\text{C}$ ) se refleja en el canalón. Sin embargo, la cámara termográfica está ajustada a una  $\epsilon = 0.95$  y una "RTC" (temperatura reflejada) =  $-55\text{ }^\circ\text{C}$  para asegurar una medición correcta de la pared. Este ajuste no es adecuado para la medición de la temperatura del canalón debido a su baja emisividad y elevada reflexión, lo que resulta en una imagen térmica que muestra el canalón excesivamente frío.

Para obtener mediciones más precisas y mostrar las temperaturas reales, se puede utilizar un software de análisis. Con este software, es posible ajustar la emisividad de ciertas áreas específicas, como el canalón en este caso. Al modificar la emisividad en el software, se puede corregir la diferencia en la cantidad de radiación infrarroja emitida y reflejada por el canalón, lo que permitirá obtener una medición más precisa de su temperatura real en la imagen termográfica.

### 3.4 DETERMINACIÓN PRÁCTICA DE LA EMISIVIDAD

Para determinar la emisividad de la superficie de un objeto se puede:

- **Consultar una tabla de emisividades**

- **Mediante una medición de referencia con un termómetro de contacto:** Se puede utilizar un termómetro de contacto para medir la temperatura real de la superficie del objeto y compararla con la temperatura medida por la cámara termográfica. La diferencia entre ambos valores puede ser atribuida a una emisividad configurada incorrectamente. Ajustando gradualmente la emisividad en la cámara termográfica hasta que ambas temperaturas coincidan, se obtendrá el valor real de la emisividad de la superficie.
- **Medición de referencia con una cámara termográfica:** Se puede adherir un trozo de cinta de emisividad conocida al objeto a medir. Esta cinta puede ser una cinta adhesiva con una emisividad conocida, una pintura de emisividad conocida o una capa gruesa de aceite resistente al calor o hollín, cada una con una emisividad específica. Después de un tiempo para que la temperatura de la cinta se ajuste a la del objeto, se mide la temperatura del área donde se encuentra la cinta con la cámara termográfica, ajustando la emisividad en la cámara al valor de la cinta. Esta temperatura medida se convierte en el valor de referencia. Luego, se ajusta gradualmente la emisividad en la cámara hasta que la temperatura medida en cualquier zona sin la cinta coincida con el valor de referencia. El valor de emisividad ajustado en la cámara corresponderá a la emisividad de la superficie del objeto medido.

### 3.5 ERRORES DE DIAGNÓSTICO EN LA MEDICIÓN POR INFRARROJOS

Los siguientes son los factores principales que pueden distorsionar los resultados de las mediciones por infrarrojos:

- **Ajuste incorrecto de la emisividad:** Es crucial conocer la emisividad ( $\epsilon$ ) de la superficie del objeto dentro del rango de medida de la cámara termográfica. La emisividad de las superficies pintadas es característica del recubrimiento y no de los materiales subyacentes. Es importante destacar que la emisividad está definida para un intervalo de longitudes de onda específico. La mayoría de los materiales de construcción tienen emisividades en el infrarrojo mayores a 0.8, pero los metales y algunas superficies brillantes poseen bajas emisividades.
- **Radiación reflejada por fuentes externas:** La radiación que llega a la cámara proviene de tres fuentes:
  - 1) Radiación emitida por el propio objeto que se está observando

- 2) Radiación del entorno del objeto reflejada por éste
- 3) Radiación emitida/absorbida por el aire

Si la reflectancia de un objeto es alta, o lo que es lo mismo, si su emisividad es baja la radiación del entorno reflejada por el objeto puede ser una de importancia a la hora de interpretar los resultados obtenidos. Esto puede suceder en:

- **Mediciones en metales:** Los metales, especialmente aquellos con superficies brillantes, son excelentes reflectores de radiación infrarroja de onda larga. Debido a su baja emisividad (que además varía con la temperatura), medir estos elementos con una cámara termográfica puede ser problemático. Si los metales están pintados, la medición es más sencilla ya que las pinturas suelen tener valores altos de emisividad.
- **Mediciones en cristales:** El vidrio, aunque es transparente en el rango visible, es completamente opaco en el rango infrarrojo, absorbiendo toda la radiación de esta banda. Esto significa que cualquier objeto ubicado detrás del vidrio, aunque esté a alta temperatura, no será detectado en una termografía. Aunque la reflectancia infrarroja de los vidrios es baja (menor a 0.15), la cámara termográfica puede detectar objetos reflejados en ellos.
- **Mediciones en superficies especulares:** Una reflexión especular claramente visible indica que una superficie es muy reflectante (es decir, tiene baja emisividad). Sin embargo, que la radiación ambiente se refleje de forma especular no depende de la emisividad, sino de la estructura de la superficie..

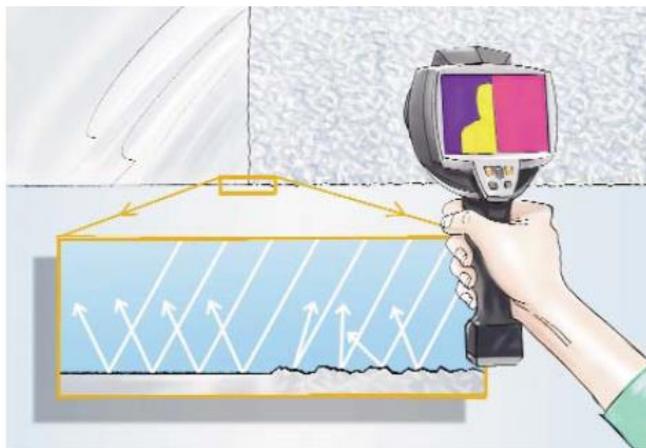


Figura 3.5.1: Reflexión especular y difusa. [14]

En la [Figura 3.5.1](#), se pueden observar claramente las siguientes características de reflexión de la radiación infrarroja en diferentes superficies:

- 1) **Superficie Especular:** En la parte lisa de la lámina de aluminio situada a la izquierda, que es una superficie especular, toda la radiación se refleja en el mismo ángulo de incidencia (reflexión especular). Esto significa que los rayos infrarrojos incidentes se reflejan de manera ordenada, manteniendo su ángulo original de incidencia, incluyendo la radiación infrarroja proveniente de la persona que toma la medición. La reflexión especular produce un patrón claro y definido en la imagen térmica.
- 2) **Superficie No Especular:** En la parte rugosa de la lámina de aluminio situada a la derecha, que es una superficie no especular, el ángulo de incidencia y el ángulo de reflexión son los mismos, pero en este caso, debido a la rugosidad de la superficie, el ángulo de reflexión de los rayos infrarrojos cambia en función del área de incidencia. La radiación infrarroja se refleja en todas direcciones (reflexión difusa), lo que implica que la difusión de la reflexión elimina cualquier trazo de la fuente de la radiación infrarroja reflejada. Esto produce una imagen térmica menos definida y más difusa en comparación con la reflexión especular.

Es importante destacar que el hecho de que una superficie sea especular no implica necesariamente que sea reflectante. Existen superficies altamente reflectantes en las que no se detecta reflexión especular. Para identificar y medir adecuadamente este tipo de superficies, se aconseja tomar medidas desde diferentes ángulos y direcciones para determinar qué irregularidades en la distribución de temperatura son atribuibles a la reflexión y cuáles se deben al objeto que se está midiendo.

- **Campo de visión:** Para realizar mediciones cuantitativas precisas, es fundamental que el objeto medido abarque todo el campo de visión de la cámara termográfica. Esto asegura que la radiación que está siendo medida por el sensor provenga exclusivamente del cuerpo que se desea medir, evitando que otras contribuciones o interferencias afecten las lecturas. Cuando los objetos se encuentran alejados o son demasiado pequeños en el campo de visión, las mediciones pueden volverse menos precisas debido a la dilución de la señal infrarroja y la posibilidad de captar radiación de otras fuentes circundantes.
- **Ángulo, enfoque, posición respecto al objeto con las que se están tomando las imágenes:** Durante la toma de imágenes termográficas, es esencial tener en cuenta el ángulo, el enfoque y la posición de la cámara en relación con el objeto que se está midiendo. Preferentemente, la superficie de la lente del sensor y la del objeto a medir deben ser paralelas para evitar distorsiones en las mediciones. La emisividad es una propiedad óptica que depende del ángulo de incidencia, por lo que las determinaciones de emisividad de los cuerpos se estandarizan para mediciones con incidencia normal. Si el ángulo de incidencia varía significativamente respecto a la incidencia normal, los errores cuantitativos en las mediciones pueden amplificarse.

Un ajuste adecuado del ángulo, enfoque y posición de la cámara garantiza mediciones más precisas y evita distorsiones en los resultados. Además, al estandarizar las mediciones para incidencia normal, se minimizan los errores relacionados con la emisividad del objeto. Estas precauciones son especialmente importantes para mediciones cuantitativas que requieran una alta precisión en la determinación de la temperatura de la superficie del objeto.

Además de los factores principales que pueden afectar las mediciones por infrarrojos, existen otros factores de menor relevancia que también pueden producir efectos no deseados en las imágenes térmicas. Algunos de estos factores son:

- **Confusión de imágenes:** En ocasiones, elementos con características similares entre sí pueden generar confusión en las imágenes termográficas, lo que dificulta la correcta identificación y medición de los objetos de interés.
- **Mala interpretación por reflexión:** La reflexión de la radiación infrarroja en superficies especulares puede llevar a una mala interpretación de la imagen térmica, lo que puede conducir a mediciones erróneas o confusas.
- **Falta de formación y conocimientos teóricos:** La falta de capacitación y conocimientos teóricos por parte del personal que utiliza la cámara termográfica puede resultar en una interpretación incorrecta de las imágenes y mediciones inexactas.
- **Uso inadecuado de la cámara:** Si la cámara termográfica no se utiliza de acuerdo a su tipología o especificaciones técnicas, puede afectar la calidad y precisión de las mediciones.
- **Selección inadecuada de la resolución y óptica:** Para una aplicación específica, elegir una resolución y óptica inadecuadas puede resultar en imágenes poco claras o falta de detalles, lo que afecta la precisión de las mediciones.
- **Elección inadecuada del rango de temperaturas:** Si el rango de temperaturas seleccionado no es el apropiado para la aplicación en cuestión, pueden perderse detalles importantes o saturar la imagen, lo que afecta la capacidad de medición.
- **Ajuste incorrecto de la RTC:** La correcta configuración de la RTC (Radiometric Temperature Calibration) es esencial para garantizar mediciones precisas. Un ajuste incorrecto puede llevar a mediciones erróneas de la temperatura.
- **Imagen térmica borrosa:** Una imagen borrosa o poco nítida puede dificultar la identificación y medición precisa de los objetos en la imagen termográfica.
- **Distancia de medición inadecuada:** Tanto una distancia demasiado corta como una distancia demasiado larga entre la cámara y el objeto pueden afectar la resolución y precisión de las mediciones.
- **Marca de medición demasiado grande:** Si la marca de medición en la imagen termográfica es demasiado grande, puede dificultar la medición precisa de áreas específicas del objeto.

- **Impedimentos en el canal de transmisión:** Obstrucciones o interferencias en el canal de transmisión de la radiación infrarroja pueden afectar la calidad de las mediciones.

### 3.6 CONDICIONES AMBIENTALES IDEALES PARA LA MEDICIÓN POR INFRARROJOS

El éxito de las mediciones por infrarrojos radica en garantizar condiciones ambientales estables, lo que permite valorar posibles fuentes de interferencia y documentarlas para un análisis preciso posterior. Para obtener mediciones térmicas confiables, se deben procurar las siguientes condiciones ideales:

- **Condiciones Ambiente Estables:** Mantener las condiciones ambientales estables durante la medición es esencial para evitar cambios bruscos en la temperatura que puedan afectar los resultados.
- **Cielo Nublado:** En caso de mediciones en exteriores, es recomendable realizarlas con el cielo nublado. Esto evita que la luz solar directa y la radiación celestial difusa fría incidan en el objeto, lo que podría distorsionar las mediciones.
- **Ausencia de Luz Solar Directa:** Evitar la luz solar directa antes y durante la medición contribuye a minimizar las influencias externas en la temperatura del objeto.
- **Sin Precipitaciones:** Realizar las mediciones en condiciones libres de precipitaciones asegura la integridad y precisión de los datos térmicos.
- **Superficie del Objeto Seca y Libre de Influencias Térmicas:** La superficie del objeto a medir debe estar seca y libre de otras influencias térmicas que puedan afectar la medición.
- **Ausencia de Viento o Corrientes de Aire:** Evitar corrientes de aire o vientos garantiza mediciones más estables y consistentes.
- **Sin Interferencias en el Entorno de Medición:** Es importante asegurarse de que no haya fuentes de interferencia en el entorno de medición que puedan alterar los resultados térmicos.
- **Emisividad Conocida y Elevada:** La superficie del objeto a medir debe tener una emisividad elevada y conocida con exactitud, lo que asegura mediciones más precisas y coherentes.

- **Distancia de Medición:** La distancia a la que se realiza la medición puede afectar la precisión de los resultados. Es fundamental ajustar la distancia de medición adecuada para obtener mediciones más precisas y evitar efectos de dilución térmica.
- **Tiempo de Estabilización:** Antes de realizar las mediciones, es recomendable dejar que el objeto alcance un estado de equilibrio térmico con su entorno. Esto garantiza que la temperatura del objeto sea representativa y estable para la medición.
- **Alineación y Encuadre:** Asegurarse de que la cámara termográfica esté adecuadamente alineada y enfocada en el área de interés es esencial para obtener imágenes térmicas claras y precisas. El encuadre relevante para la medición debe ser cuidadosamente seleccionado.
- **Compensación de la Temperatura Reflejada (RTC):** La compensación de la temperatura reflejada es un ajuste crucial que debe realizarse para corregir las influencias de la radiación ambiental reflejada en la superficie del objeto medido.
- **Calibración y Verificación:** Realizar calibraciones periódicas y verificar el rendimiento de la cámara termográfica asegura la precisión y confiabilidad de las mediciones a lo largo del tiempo.
- **Estimación del Error:** Es importante conocer y considerar el posible error en las mediciones, que puede estar influenciado por diversos factores como la sensibilidad térmica, la precisión de la cámara y la estabilidad ambiental.
- **Documentación y Registro:** Registrar todas las condiciones ambientales, ajustes de la cámara, distancia de medición, y cualquier otro dato relevante durante el proceso de medición es fundamental para facilitar el análisis posterior y garantizar la trazabilidad de los resultados.

La combinación de condiciones ambientales ideales, ajustes precisos en la cámara y la correcta preparación del objeto a medir, aseguran mediciones por infrarrojos más confiables y precisas. Estos aspectos adicionales proporcionan una base sólida para la interpretación y análisis adecuado de las imágenes térmicas, lo que es crucial en aplicaciones donde la exactitud y la coherencia son fundamentales para la toma de decisiones.

### 3.7 CONSIDERACIONES PARA LA CAPTURA DE IMÁGENES TÉRMICAS PRECISAS

En la termografía, al igual que en la fotografía digital, la toma de la imagen térmica es un proceso crucial, ya que no se puede alterar el encuadre o el enfoque después de capturarla. Por lo tanto, al tomar una imagen térmica, es imperativo seguir ciertos pasos para obtener resultados precisos y significativos:

- **Determinar el Área Adecuada y Enfocar la Imagen Térmica:** Es esencial determinar el área relevante para la medición y asegurarse de enfocar correctamente la imagen térmica en ese encuadre. Esto garantiza que la información térmica capturada sea relevante y útil para el análisis.
- **Ajustes en la Cámara y el Software de Análisis:** Para lograr una imagen térmica óptima, se pueden realizar varios ajustes en la cámara y el software de análisis:
  - Cambiar los ajustes de emisividad y la compensación de la temperatura reflejada (RTC) para adaptarse al material del objeto medido.
  - Elegir una paleta de colores adecuada para una representación visual clara y efectiva de las temperaturas.
  - Ajustar manualmente la escala de temperatura para resaltar las variaciones térmicas relevantes.
- **Prevenir Interferencias y Fuentes de Error:** Es fundamental prevenir o evitar cualquier posible fuente de interferencia en la medición térmica. Algunas medidas para lograrlo son:
  - Asegurarse de que la superficie del objeto a medir esté libre de fuentes de interferencia ópticas o térmicas.
  - Retirar envoltorios u objetos del entorno que puedan causar interferencias en la medición.
  - Cambiar la posición al medir para identificar posibles reflexiones que puedan afectar la medición.

- **Distancia y Uso de Objetivo Apropriado:** Medir siempre a la menor distancia posible del objeto y utilizar un objetivo adecuado para cada tarea de medición. Esto asegura una mayor precisión en la captura de detalles térmicos.
- **Conocer el Diseño del Objeto a Medir:** Es importante tener conocimiento del diseño del objeto a medir para identificar correctamente sus características térmicas y evitar interpretaciones incorrectas.
- **Combinar Imágenes Reales y Térmicas:** Utilizar una cámara termográfica con cámara digital integrada permite tomar imágenes reales junto con las imágenes térmicas y analizarlas de manera conjunta para un análisis más completo.
- **Documentar Condiciones Ambientales:** Registrar todas las condiciones ambientales relevantes y medirlas según sea necesario para tenerlas en cuenta en el análisis posterior de las imágenes térmicas.
- **Estabilidad y Tiempo de Captura:** Es importante asegurarse de que la cámara termográfica se encuentre en una posición estable durante la captura de imágenes. Utilizar un trípode o una superficie firme puede reducir el movimiento no deseado y garantizar mediciones más precisas, especialmente al capturar detalles pequeños.
- **Tiempo de Captura y Tasa de Refresco:** El tiempo de captura y la tasa de refresco de la cámara son aspectos a tener en cuenta. En aplicaciones donde el objeto en estudio está en movimiento o experimenta cambios rápidos de temperatura, es esencial utilizar una cámara con una tasa de refresco lo suficientemente alta para capturar cambios térmicos en tiempo real.
- **Calibración Regular:** Las cámaras termográficas requieren calibraciones regulares para mantener su precisión. Es recomendable realizar calibraciones periódicas según las especificaciones del fabricante o según la frecuencia de uso y condiciones ambientales.
- **Control de la Iluminación:** El control adecuado de la iluminación en el entorno es esencial para obtener mediciones precisas. Fuentes de luz brillante y directa pueden afectar la calidad de la imagen térmica y provocar mediciones erróneas. En casos donde la iluminación no pueda controlarse, se pueden utilizar técnicas como la emisión de radiación infrarroja artificial para fines de calibración.

- **Condiciones Ambientales y Atmosféricas:** Las condiciones ambientales, como la humedad, la radiación solar y la presencia de niebla, pueden afectar la medición térmica. Es importante tener en cuenta estas condiciones y, en la medida de lo posible, realizar mediciones en condiciones atmosféricas estables y controladas.
- **Interpretación de las Imágenes Térmicas:** La interpretación adecuada de las imágenes térmicas es clave para obtener resultados precisos y significativos. Capacitar al operador en la identificación de patrones térmicos relevantes y en la comprensión de las variaciones de temperatura es fundamental para una interpretación correcta.
- **Documentación y Reportes:** Documentar adecuadamente las mediciones termográficas, incluyendo información sobre la ubicación, condiciones ambientales, ajustes de la cámara, y cualquier otra consideración relevante, es esencial para mantener un registro detallado y generar informes completos y fiables.
- **Formación y Experiencia del Operador:** La formación y experiencia del operador de la cámara termográfica son cruciales para obtener mediciones precisas y aplicar adecuadamente las técnicas de corrección y ajuste. Un operador capacitado puede tomar decisiones informadas durante el proceso de medición y análisis, lo que conduce a resultados más confiables.

Siguiendo estas recomendaciones y consideraciones, se maximiza la precisión y utilidad de las imágenes térmicas capturadas, lo que permite una aplicación efectiva de la termografía en diversas industrias y campos, incluyendo mantenimiento predictivo, inspecciones industriales, diagnóstico médico, y muchas otras aplicaciones especializadas.

### 3.8 HERRAMIENTAS HABITUALES DEL TERMÓGRAFO

En el ejercicio de la termografía, el termógrafo cuenta con diversas herramientas que le permiten llevar a cabo mediciones precisas y eficientes. A continuación, se presentan algunas de las herramientas más habituales utilizadas por los profesionales en este campo:

- 1) **Funda Blanda o Bolsa para la Cámara y Herramientas:** Una funda blanda o bolsa de transporte es esencial para proteger la cámara termográfica y otras herramientas durante su transporte y almacenamiento.
- 2) **Rollo de Cinta Aislante Negra:** Este elemento es utilizado para mejorar la emisividad de los objetos con baja emisividad. Al recubrirlos con cinta aislante negra, es posible aumentar su capacidad para emitir radiación infrarroja, lo que resulta en mediciones más precisas.
- 3) **Papel de Aluminio:** El papel de aluminio es empleado para calcular la temperatura aparente reflejada en superficies y objetos que puedan estar generando reflexiones en el objeto que se está midiendo. Además, puede utilizarse para apantallar objetos que reflejen radiación, evitando así interferencias en la medición.
- 4) **Juego de Destornilladores:** Un juego de destornilladores es útil para abrir cuadros eléctricos y acceder a zonas de difícil acceso donde se requiere realizar mediciones termográficas.
- 5) **Trípode:** El uso de un trípode permite fijar la cámara termográfica en una posición estable, garantizando así que los termogramas se capturen de forma nítida y sin movimientos indeseados.
- 6) **Tarjeta de Memoria de Elevada Capacidad:** Dado que las imágenes termográficas pueden ocupar un espacio considerable, contar con una tarjeta de memoria de alta capacidad resulta fundamental para almacenar y guardar todas las imágenes capturadas.
- 7) **Cargadores:** Los cargadores son esenciales para mantener la batería de la cámara y otros dispositivos recargables en pleno funcionamiento durante las inspecciones.
- 8) **Smartphone:** Un smartphone puede ser de gran utilidad para analizar las imágenes termográficas in situ, visualizar resultados y tomar decisiones en tiempo real.
- 9) **Instrumentos de Medida Complementarios:** Adicionalmente, el termógrafo puede llevar consigo instrumentos de medida complementarios, como pinzas amperimétricas, termómetros

de contacto, sondas de temperatura, entre otros. Estas herramientas adicionales permiten realizar mediciones más completas y precisas en determinadas aplicaciones.

- 10) Linterna o Lámpara de Luz Blanca:** Una linterna o lámpara de luz blanca es útil para iluminar áreas oscuras o poco iluminadas durante la inspección termográfica, permitiendo una mejor visualización y ubicación precisa del objeto a medir.
- 11) Paño de Limpieza:** Un paño suave de limpieza es esencial para mantener la lente de la cámara termográfica libre de polvo, suciedad y manchas que puedan afectar la calidad de las imágenes capturadas.
- 12) Nivel de Burbuja:** Un nivel de burbuja puede ayudar al termógrafo a asegurarse de que la cámara esté bien nivelada al realizar mediciones en superficies horizontales, evitando errores causados por una inclinación incorrecta.
- 13) Cinta Métrica:** La cinta métrica es útil para medir distancias y dimensiones físicas de objetos y estructuras, lo que puede ser útil para realizar mediciones más precisas y comparaciones en el análisis posterior.
- 14) Computadora o Tablet:** Una computadora portátil o tablet puede ser útil para analizar las imágenes termográficas con mayor detalle, realizar informes y procesar datos en el lugar de la inspección.
- 15) Equipo de Protección Personal (EPP):** Dependiendo de la naturaleza de la inspección, es importante contar con el equipo de protección personal adecuado, que puede incluir guantes, casco, gafas de seguridad, etc., para garantizar la seguridad del termógrafo en el entorno de trabajo.

El uso adecuado de estas herramientas, junto con una formación adecuada en el manejo de la cámara termográfica, contribuye a obtener resultados confiables y valiosos en diversas aplicaciones de la termografía.



Figura 3.8.1: Herramientas comunes del termógrafo. [1]

### 3.9 INTERPRETACIÓN DE LA IMAGEN TÉRMICA

La imagen térmica es una herramienta fundamental en la termografía, ya que es la base para realizar análisis, diagnósticos y toma de decisiones en diversas aplicaciones. Sin embargo, es esencial comprender que la imagen térmica no muestra directamente la distribución real de temperaturas en los objetos medidos, sino la intensidad de la radiación térmica emitida por ellos. Esta intensidad de radiación está influenciada por varios factores, como la emisividad del material, el entorno y posibles reflejos.

Una de las consideraciones clave al interpretar la imagen térmica es el concepto de "temperatura aparente". Las diferencias en intensidades de radiación no siempre se traducen en diferencias de temperatura real. Por ejemplo, zonas distintas de un mismo objeto pueden estar a la misma temperatura, pero con distintas emisividades. Esto puede provocar que la imagen térmica muestre un contraste reflejado en la paleta de colores, lo que puede llevar a interpretar erróneamente que existen diferentes temperaturas.

Para ilustrar esto, en la [Figura 3.9.1](#) se muestra una imagen infrarroja de ventanas en una fachada. A simple vista, parece que hay una diferencia de temperatura significativa entre dos de las ventanas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la cámara termográfica está mostrando la temperatura aparente y que la radiación reflejada en una de las ventanas puede dar lugar a una intensidad de

radiación más elevada, aunque ambas ventanas estén a la misma temperatura real. En este caso, el contraste en la imagen térmica no necesariamente indica una diferencia de temperatura.



Figura 3.9.1: Imagen Infrarroja de las ventanas de una fachada. [1]

Es fundamental para el termógrafo comprender estas limitaciones y considerar factores como la emisividad de los objetos, la influencia de reflejos y la relación entre la intensidad de radiación y la temperatura real. Para obtener mediciones precisas y diagnósticos confiables, es crucial ajustar adecuadamente la cámara termográfica en función de la emisividad de los objetos y evitar fuentes de interferencia que puedan afectar las mediciones.

La formación y experiencia del termógrafo juegan un papel crucial en la interpretación adecuada de la imagen térmica y la obtención de resultados precisos en diferentes tareas de termografía. Con conocimientos sólidos y el uso adecuado de la cámara termográfica, se pueden realizar análisis y diagnósticos más precisos en aplicaciones como la inspección de edificios, el mantenimiento predictivo y la detección de problemas eléctricos y mecánicos, entre otros. Asimismo, es fundamental recordar que la imagen térmica es una valiosa herramienta para visualizar la intensidad de la radiación térmica, pero no proporciona directamente la distribución exacta de temperaturas en los objetos medidos.

### 3.10 ANALISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO

El termógrafo puede realizar por tanto dos tipos básicos de análisis de la misma imagen infrarroja, en función de sus intereses, el grado de exactitud que necesite o de las necesidades del cliente. Son los siguientes:

- **Análisis cualitativo:** la imagen se analiza para poner de manifiesto anomalías de distinta magnitud, localizarlas y evaluar el nivel de gravedad. Es el primer análisis se realiza, aunque se quiera hacer otro tipo de análisis (cuantitativo), inevitablemente al comienzo se tratará de rápidamente buscar aquello que en nuestra cabeza no encaja o se ve que se aleja de lo normal para el objeto bajo estudio. El 90% de las inspecciones son de este tipo.

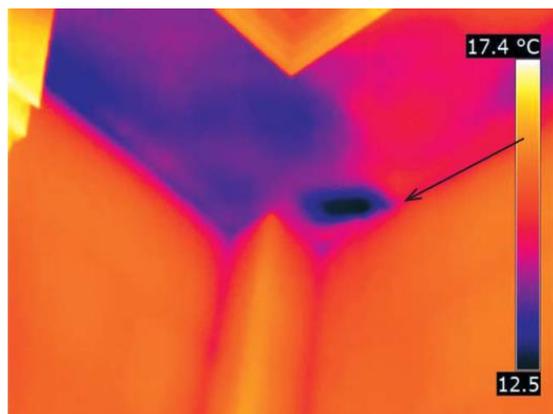


Figura 3.10.1: Imagen infrarroja de la esquina con humedades de una habitación. [1]

En la Figura 3.10.1, la mancha azul oscura de la esquina de la habitación indica la presencia de humedad. No se pretende cuantificar la cantidad de agua que entra, únicamente saber por dónde entra y cómo evitar que entre

- **Análisis cuantitativo:** determina la temperatura o temperaturas de las partes de la imagen térmica que interesan para, a partir de éstas, extraer las conclusiones sobre las anomalías detectadas y las soluciones a adoptar.

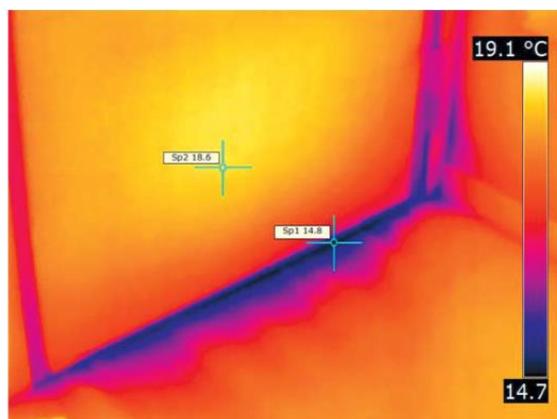


Figura 3.10.2: Imagen infrarroja de filtraciones de aire. [1]

En la Figura 3.10.2 para cuantificar las pérdidas de calor se necesitan conocer datos como la temperatura exterior e interior y las propiedades de la superficie por donde entra aire. Se usan en el análisis:

- Temperaturas reales
- Temperatura aparente reflejada
- Compensación de los parámetros de objeto de emisividad

De los resultados obtenidos se podrán sacar distintas conclusiones en función de los criterios de clasificación de fallos propios o publicados por algún organismo o asociación relevante. Es posible errar en las conclusiones aun habiendo realizado bien la compensación y haber obtenido datos reales. Por último, es recomendable usar datos históricos que permitan saber si la temperatura de un componente temperatura es elevada o baja respecto al mismo en estado normal.

### 3.11 LA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA

La inspección termográfica es una técnica instrumental que permite obtener información sobre las condiciones de equipos mediante la observación de sus temperaturas de operación. Esta práctica no destructiva es fundamental para detectar tempranamente posibles fallas y anomalías en sistemas y equipos, ayudando a reducir paradas no programadas y mejorar la productividad y seguridad operativa. El informe resultante de una inspección termográfica proporciona imágenes digitales y térmicas de equipos en condiciones anormales de temperatura, clasificación de posibles fallas y recomendaciones para eliminarlas. Además, se busca definir tendencias en los historiales térmicos para un mejor análisis.

La inspección termográfica se aplica en sistemas eléctricos, mecánicos, electrónicos y térmicos. Para llevarla a cabo exitosamente, se deben seguir pasos como la generación de órdenes de trabajo, revisión de historiales térmicos, obtención de permisos, verificación del equipo de termografía, identificación de equipos a examinar, ejecución de la inspección, análisis de termogramas, generación de reportes y actualización de registros.

El conocimiento y experiencia adecuados, así como la certificación y competencia profesional de los técnicos, son aspectos críticos para garantizar la calidad y precisión de las inspecciones. La formación y capacitación en termografía son esenciales para maximizar la eficacia de los programas de

inspección, mejorar la fiabilidad y seguridad de equipos y sistemas, y prevenir posibles fallos que puedan afectar su rendimiento y operación.

La inspección termográfica es una valiosa herramienta para el mantenimiento predictivo y preventivo de equipos industriales y sistemas complejos. Su capacidad de evaluar equipos en funcionamiento real sin interrumpir la operación la hace altamente eficiente y útil en diversas aplicaciones industriales.

### 3.11.1 BENEFICIOS DE LA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA

La implementación de un programa de inspecciones termográficas periódicas ofrece diversos beneficios para las industrias y empresas que utilizan esta técnica como parte de su estrategia de mantenimiento. Algunos de los principales beneficios son los siguientes:

- **Minimización de fallas y averías:** La inspección termográfica permite detectar tempranamente posibles problemas en los equipos, lo que reduce la probabilidad de fallas inesperadas o averías. Al identificar áreas con temperaturas anormales, se pueden tomar medidas preventivas y correctivas antes de que los problemas se agraven.
- **Reducción de paradas no programadas:** Al anticiparse a las fallas y realizar mantenimientos preventivos, se disminuye la ocurrencia de paradas no planificadas en la producción. Esto aumenta la disponibilidad de los equipos y la eficiencia operativa de la planta.
- **Aumento de la seguridad:** La inspección termográfica ayuda a identificar puntos calientes que podrían representar riesgos de incendio o accidentes. Al corregir estas condiciones peligrosas, se mejora la seguridad para los trabajadores y el entorno laboral.
- **Mejora de la eficiencia energética:** La detección de pérdidas de calor o fugas en sistemas térmicos y eléctricos permite corregir ineficiencias y optimizar el uso de energía. Esto se traduce en ahorros significativos en los costos operativos y una mayor sostenibilidad ambiental.
- **Definición de tendencias y seguimiento:** La generación de informes y curvas de tendencia basadas en datos termográficos a lo largo del tiempo permite monitorear el comportamiento de los equipos y sistemas. Esto facilita la planificación de futuras intervenciones y el seguimiento de la efectividad de las acciones correctivas.

### 3.11.2 METODOLOGÍA DE LA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA

La inspección termográfica es una herramienta poderosa que permite detectar anomalías y problemas potenciales en equipos y sistemas mediante la observación de sus temperaturas de operación. Para llevar a cabo esta inspección de manera efectiva, se requiere seguir una metodología cuidadosamente planificada y ejecutada. A continuación, se detalla cada uno de los subapartados de la metodología:

- 1) **Generación de órdenes de trabajo:** La generación de órdenes de trabajo es un paso fundamental en la inspección termográfica. En esta etapa, se planifican las inspecciones periódicas, se establecen las áreas y equipos a examinar y se definen los horarios y la frecuencia de las inspecciones. También se incluye cualquier información adicional relevante para el proceso, como las condiciones operativas esperadas y los objetivos específicos de la inspección.
- 2) **Revisión de historiales térmicos:** Antes de iniciar la inspección, es importante revisar los historiales térmicos previos del equipo o sistema que se va a examinar. Estos registros proporcionan información valiosa sobre el comportamiento térmico pasado, lo que permite identificar patrones, cambios o tendencias que puedan ser indicativos de posibles problemas. La revisión de los historiales térmicos también ayuda a establecer una línea base para comparar los resultados actuales de la inspección.
- 3) **Obtención de permisos y autorizaciones:** En muchas instalaciones industriales o comerciales, la inspección termográfica puede requerir el acceso a áreas restringidas o la autorización para trabajar cerca de equipos críticos. Antes de iniciar la inspección, se deben obtener todos los permisos y autorizaciones necesarios para evitar interrupciones y garantizar la seguridad de los técnicos y el personal involucrado.
- 4) **Verificación del estado de la cámara termográfica y sus componentes:** La cámara termográfica es la herramienta principal en la inspección, por lo que es esencial asegurarse de que esté en óptimas condiciones de funcionamiento. Antes de comenzar la inspección, se verifica que la cámara esté calibrada correctamente, los sensores estén en buen estado y la batería esté cargada. También se comprueba que todos los componentes estén bien ensamblados para evitar problemas durante la inspección.

- 5) **Identificación de equipos a examinar:** En esta etapa, se identifican los equipos y sistemas específicos que serán objeto de la inspección termográfica. Se establece un plan de ruta para recorrer las diferentes áreas y ubicaciones de los equipos a inspeccionar. Es importante priorizar aquellos equipos críticos o que presenten historial de problemas térmicos.
- 6) **Ejecución de la inspección:** Durante la ejecución de la inspección, se capturan las imágenes termográficas de los equipos y áreas identificadas previamente. Los técnicos deben mantener una distancia adecuada y un ángulo de visión óptimo para obtener imágenes claras y precisas. La inspección puede llevarse a cabo en diferentes condiciones ambientales, dependiendo de los objetivos específicos de la misma.
- 7) **Análisis de los termogramas:** Una vez que se han capturado todas las imágenes termográficas, se procede al análisis de los termogramas. En esta etapa, se examinan cuidadosamente las imágenes para identificar posibles puntos calientes o fríos, patrones anómalos y cualquier otro indicio de problemas o deficiencias térmicas. El análisis se realiza tanto de manera visual como mediante el uso de software de procesamiento de imágenes.
- 8) **Generación de reportes y actualización de registros:** Con los resultados del análisis, se elaboran los reportes de inspección. Estos informes incluyen la descripción detallada de los equipos en condiciones anormales de temperatura, las imágenes térmicas capturadas, la clasificación de posibles fallas y las recomendaciones para su corrección. Además, se actualizan los registros de inspección para llevar un seguimiento de la evolución de los equipos y sistemas a lo largo del tiempo.

La correcta aplicación de esta metodología garantiza que la inspección termográfica se realice de manera sistemática, eficiente y profesional, proporcionando resultados confiables y útiles para la toma de decisiones en cuanto al mantenimiento, eficiencia energética y seguridad de los equipos y sistemas inspeccionados.

### 3.11.3 INFORME DE INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA

El informe de la inspección termográfica es el resultado final del proceso de análisis instrumental realizado en los equipos y sistemas. Este informe es una herramienta crucial para la toma de decisiones en cuanto al mantenimiento, seguridad y eficiencia de los equipos, y debe ser elaborado de manera clara y detallada. A continuación, se describen los elementos clave que deben incluirse en el informe:

- **Descripción de equipos en condiciones anormales de temperatura:** En este apartado, se proporciona una descripción detallada de los equipos y sistemas que presentaron temperaturas anormales durante la inspección termográfica. Se identifican los puntos calientes o fríos, las zonas con distribuciones térmicas irregulares y cualquier otro comportamiento atípico detectado. Esta descripción incluye información relevante sobre cada equipo, como su ubicación, función, estado operativo y cualquier otro detalle que pueda ayudar a comprender el contexto de las anomalías térmicas.
- **Imágenes digitales y térmicas de la ubicación de los equipos:** En esta sección del informe, se incluyen las imágenes termográficas capturadas durante la inspección, así como imágenes digitales que muestren la ubicación y aspecto general de los equipos y áreas inspeccionados. Las imágenes térmicas muestran claramente las variaciones de temperatura, mientras que las imágenes digitales proporcionan un contexto visual para comprender la ubicación exacta de las anomalías detectadas.
- **Clasificación de posibles fallas:** En este apartado, se clasifican las posibles fallas o anomalías detectadas durante la inspección termográfica. Estas clasificaciones pueden variar según el tipo de equipo o sistema inspeccionado y pueden incluir categorías como sobrecalentamiento, pérdida de aislamiento térmico, fugas de calor, desgaste en componentes, entre otros. Cada clasificación se acompaña de una descripción detallada de la naturaleza y posibles causas de la anomalía.
- **Recomendaciones para eliminar anomalías detectadas:** En este punto del informe, se proporcionan recomendaciones específicas para corregir las anomalías detectadas durante la inspección. Estas recomendaciones pueden incluir acciones de mantenimiento correctivo, ajustes operativos, reparaciones de componentes dañados o reemplazo de equipos defectuosos. Cada recomendación debe ser clara, práctica y orientada a resolver eficazmente las anomalías detectadas.
- **Inclusión de curvas de tendencia si están disponibles:** Si se cuenta con registros históricos de temperaturas o datos relevantes de los equipos, se pueden incluir curvas de tendencia en el informe. Estas curvas permiten visualizar la evolución temporal de las temperaturas y ayudan a identificar patrones o comportamientos cíclicos que podrían indicar problemas en desarrollo.

La inclusión de curvas de tendencia proporciona una perspectiva más completa y valiosa para el análisis de los datos obtenidos.

El informe de la inspección termográfica es un documento valioso que sirve como base para la toma de decisiones en cuanto al mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos y sistemas inspeccionados. Un informe bien estructurado y completo facilita la comunicación entre los técnicos, ingenieros y responsables de mantenimiento, permitiendo implementar las acciones necesarias para garantizar la operatividad, seguridad y eficiencia de los equipos industriales y sistemas eléctricos.

### **3.11.4 CERTIFICACIÓN Y COMPETENCIA PROFESIONAL EN TERMOGRAFÍA**

La certificación y competencia profesional en termografía son aspectos críticos para garantizar la calidad, confiabilidad y precisión de las inspecciones termográficas. Los técnicos certificados en esta disciplina cuentan con la formación y experiencia necesarias para llevar a cabo análisis precisos y completos, lo que asegura que los resultados obtenidos sean confiables y útiles para la toma de decisiones en la industria.

#### **3.11.4.1 REQUISITOS DE FORMACIÓN Y CAPACITACIÓN EN TERMOGRAFÍA**

Para obtener la certificación en termografía, los técnicos deben completar cursos especializados que abarquen temas relacionados con la física de transferencia de calor e infrarrojos, técnicas de análisis, procedimientos de inspección e informes específicos para cada aplicación. Estos cursos proporcionan la base teórica y práctica necesaria para llevar a cabo inspecciones termográficas de manera efectiva y segura.

#### **3.11.4.2 NORMATIVAS Y ESTÁNDARES DE CERTIFICACIÓN**

Existen diversas normativas y estándares internacionales que establecen los requisitos para la certificación de técnicos en termografía. Algunas de las organizaciones más reconocidas en este campo son ASNT (American Society for Nondestructive Testing), ISO (International Organization for Standardization) y EN 473 (norma europea de ensayos no destructivos). Estas entidades acreditadas por el organismo competente e independiente de cada país aseguran que los técnicos certificados cumplen con los estándares de calidad y competencia requeridos.

### 3.11.4.3 NIVELES DE COMPETENCIA (NIVEL I, NIVEL II, NIVEL III) Y TAREAS ASOCIADAS A CADA NIVEL.

La certificación en termografía generalmente se clasifica en tres niveles de competencia, que son los siguientes:

- **Nivel I:**
  - Configuración y ajuste de la cámara termográfica.
  - Captura de datos termográficos.
  - Clasificación de los datos obtenidos.
  - Reconocimiento de fallos básicos.
  - Elaboración de informes básicos.
  
- **Nivel II:**
  - Selección de equipos adecuados para cada aplicación.
  - Supervisión del trabajo de un nivel I.
  - Establecimiento de procedimientos y limitaciones.
  - Conocimiento del objeto o instalación inspeccionada.
  - Diagnóstico de anomalías y acciones correctivas.
  - Medición precisa de temperaturas mediante termografía.
  - Elaboración de informes sobre las anomalías detectadas.
  
- **Nivel III:**
  - Desarrollo de procedimientos y programas de mantenimiento.
  - Establecimiento de criterios específicos de gravedad.
  - Evaluación de normativas.
  - Integración de la termografía con otras técnicas de END.

- Además de completar los cursos correspondientes, se requiere demostrar periodos mínimos de experiencia y competencia para ascender a un nivel superior, así como renovar periódicamente cada nivel certificado.

La certificación y competencia profesional son aspectos críticos para garantizar la calidad, confiabilidad y precisión de las inspecciones termográficas. Los técnicos certificados ofrecen un alto nivel de conocimiento y experiencia, lo que se traduce en resultados más precisos y valiosos para la toma de decisiones en la industria. Al contar con profesionales capacitados, las empresas pueden maximizar la eficacia de sus programas de inspección termográfica y mejorar la fiabilidad y seguridad de sus equipos y sistemas.

### 3.11.5 GARANTIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS INSPECCIONES TERMOGRÁFICAS

La calidad de las inspecciones termográficas es fundamental para obtener resultados precisos y confiables que ayuden a tomar decisiones informadas sobre el mantenimiento, seguridad y eficiencia de los equipos. Para garantizar esta calidad, es esencial contar con técnicos debidamente capacitados y certificados, así como con la supervisión de entidades acreditadas que verifiquen y respalden la competencia de los profesionales en esta área. A continuación, se describen algunos aspectos clave para garantizar la calidad de las inspecciones termográficas:

- **Rol de las entidades acreditadas (ENAC u organismos equivalentes):** Las entidades acreditadas, como ENAC (Entidad Nacional de Acreditación) en España o sus equivalentes en otros países, juegan un papel fundamental en el proceso de certificación de los técnicos en termografía. Estas entidades son responsables de evaluar y verificar la competencia y capacitación de los profesionales para llevar a cabo inspecciones termográficas de manera adecuada y precisa. La certificación otorgada por entidades acreditadas garantiza que el técnico ha sido sometido a un proceso de evaluación riguroso y cumple con los estándares y normativas establecidas en la industria.
- **Demostración de periodos mínimos de experiencia y competencia:** Para obtener la certificación en termografía, los técnicos deben demostrar su competencia a través de la realización de cursos de formación específicos en la materia. Además, es común que se exija un periodo mínimo de experiencia en el campo de la termografía para poder acceder a los

niveles de certificación más altos. Esta experiencia práctica es vital para que los técnicos adquieran el conocimiento necesario para interpretar adecuadamente las imágenes termográficas y realizar un análisis efectivo de los equipos y sistemas inspeccionados.

- **Renovación periódica de la certificación:** La termografía es una técnica en constante evolución, y los avances tecnológicos y las mejores prácticas en el campo pueden cambiar con el tiempo. Por esta razón, es necesario que los técnicos certificados renueven periódicamente su certificación, lo que implica someterse a cursos de actualización y demostrar que mantienen sus habilidades y conocimientos actualizados. La renovación periódica de la certificación garantiza que los técnicos estén al día con los últimos avances en la industria y sigan cumpliendo con los estándares de calidad requeridos.
- **Importancia de la certificación y competencia profesional:** La certificación de los técnicos en termografía y su competencia profesional son aspectos críticos para garantizar la calidad, confiabilidad y precisión de las inspecciones termográficas. Los técnicos certificados ofrecen un alto nivel de conocimiento y experiencia, lo que se traduce en resultados más precisos y valiosos para la toma de decisiones en la industria. Al contar con profesionales capacitados, las empresas pueden maximizar la eficacia de sus programas de inspección termográfica y mejorar la fiabilidad y seguridad de sus equipos y sistemas.

### 3.11.6 VENTAJAS DE CONTAR CON TÉCNICOS CERTIFICADOS

Contar con técnicos certificados en termografía ofrece una serie de ventajas significativas para las empresas y la industria en general. Estos profesionales altamente capacitados y competentes aportan valor en diversos aspectos relacionados con la inspección termográfica. A continuación, se detallan algunas de las ventajas más destacadas de contar con técnicos certificados:

- **Mayor precisión y confiabilidad en los resultados:** Los técnicos certificados en termografía poseen un sólido conocimiento en física de transferencia de calor e infrarrojos, así como en técnicas de análisis y procedimientos de inspección. Gracias a esta formación especializada, están capacitados para capturar y analizar imágenes termográficas con mayor precisión y confiabilidad. Su experiencia les permite identificar de manera acertada las anomalías térmicas y evaluar el estado de los equipos y sistemas inspeccionados, lo que se traduce en resultados más precisos y fiables.

- **Mejora en la toma de decisiones en la industria:** Los informes generados por técnicos certificados proporcionan información detallada sobre el estado de los equipos y sistemas. Esta información es esencial para la toma de decisiones informadas en cuanto a mantenimiento, reparaciones y optimización de procesos. Al contar con datos precisos y confiables provenientes de inspecciones termográficas realizadas por profesionales certificados, las empresas pueden tomar decisiones estratégicas que mejoren la eficiencia operativa y reduzcan los tiempos de parada no programada.
- **Maximización de la eficacia de los programas de inspección termográfica:** La presencia de técnicos certificados en termografía permite establecer programas de inspección más efectivos y enfocados en las necesidades específicas de la industria. Estos profesionales pueden identificar y priorizar los equipos y sistemas críticos que requieren una atención especial, lo que optimiza la asignación de recursos y tiempo. Además, al realizar inspecciones periódicas de manera adecuada, se pueden detectar posibles problemas en etapas tempranas, evitando así costosas reparaciones y paradas no programadas.
- **Aseguramiento de la fiabilidad y seguridad de los equipos y sistemas:** La inspección termográfica llevada a cabo por técnicos certificados ayuda a garantizar la fiabilidad y seguridad de los equipos industriales y sistemas eléctricos. Al identificar posibles fallas o anomalías en el funcionamiento de los equipos, se pueden tomar medidas preventivas o correctivas para evitar accidentes, daños o interrupciones en la producción. La detección temprana de problemas potenciales a través de la termografía contribuye a mantener la integridad y el rendimiento óptimo de los equipos, lo que a su vez mejora la seguridad de los trabajadores y la operación general de la planta.

---

# 4 Aplicaciones termográficas

---

## 4.1 TERMOGRAFÍA EN EDIFICIOS

La inspección de edificios con cámaras termográficas se ha convertido en una herramienta invaluable para el diagnóstico y supervisión del estado de los edificios. Mediante el uso de tecnología termográfica, es posible visualizar y documentar problemas de manera anticipada, lo que permite tomar medidas correctivas antes de que se agraven y se vuelvan más costosos de reparar.

La termografía infrarroja es un método no destructivo que permite medir de manera cuantitativa la distribución térmica en la superficie de análisis. En combinación con técnicas clásicas de monitorización de edificios, se convierte en una poderosa herramienta para la detección de defectos en la envolvente de los edificios, como falta de aislamiento, infiltraciones, puentes térmicos, entre otros.

En países altamente desarrollados como España, la termografía se ha integrado completamente en el campo de la construcción debido al especial interés en reducir el consumo energético de los edificios y garantizar un mantenimiento predictivo. A lo largo de los años, el precio de los equipos termográficos ha disminuido gradualmente, lo que ha permitido que este método no destructivo sea más accesible y se utilice en países con menos desarrollo.

La aplicación de la termografía en la edificación es particularmente interesante y compleja, ya que intervienen numerosos factores y áreas de conocimiento, como las propiedades de los materiales, la electricidad, la calefacción, el aire acondicionado y las redes de tuberías. La termografía permite magnificar de manera precisa los estados transitorios de las superficies en condiciones diversas, lo que mejora significativamente la comprensión del comportamiento térmico de los materiales utilizados en la construcción.

Algunas de las aplicaciones más comunes de la termografía en la construcción incluyen la visualización de pérdidas de energía en las estructuras, la detección de falta de aislamiento o aislamiento defectuoso, la localización de fugas de aire en sistemas de ventilación, la identificación de humedad en los tejados y muros, tanto en la estructura interior como en la exterior, la detección de moho y áreas mal aisladas, la localización de puentes térmicos, la detección de filtraciones de agua en tejados planos, la identificación de roturas en tuberías de agua caliente, la detección de fallos de

construcción, el seguimiento del proceso de secado de edificios y la detección de fallos eléctricos en sistemas de calefacción central.

Las cámaras termográficas se han convertido en una herramienta indispensable para localizar e identificar fallos, ya que permiten visualizar lo invisible. Mediante una termografía, los problemas se vuelven evidentes de manera inmediata, lo que facilita la toma de decisiones y la planificación de acciones correctivas. La termografía proporciona a los expertos de la construcción información crucial sobre las condiciones de aislamiento, la presencia de humedad, el desarrollo de moho, los fallos eléctricos, la existencia de puentes térmicos y las condiciones de los sistemas de climatización.

Es importante destacar que las cámaras termográficas tienen una amplia gama de aplicaciones en el campo de la construcción, y cada día se desarrollan nuevas formas innovadoras de utilizar esta tecnología. Gracias a su versatilidad y precisión, las cámaras termográficas se han convertido en una herramienta imprescindible para garantizar la eficiencia energética, la calidad de construcción y el mantenimiento adecuado de los edificios.

#### **4.1.1 INSPECCIÓN CUALITATIVA Y CUANTITATIVA**

La termografía aplicada a la edificación se divide en dos categorías: cualitativa y cuantitativa. El enfoque cualitativo se basa en el conocimiento y experiencia del termógrafo y la ciencia de la construcción para identificar posibles defectos en la envoltura del edificio. En este enfoque, no se centra en las mediciones de temperatura, sino en las diferencias de radiación infrarroja (diferencias de color en la imagen térmica) para determinar las áreas con pérdidas de calor excesivas.

Por otro lado, los enfoques cuantitativos utilizan el mismo proceso de identificación de defectos, pero van un paso más allá al utilizar las temperaturas medidas para determinar la cantidad de calor que se está perdiendo.

La elección del método dependerá de los objetivos que se busquen alcanzar. Si se desea identificar únicamente los defectos en la envoltura del edificio, una inspección cualitativa será suficiente. Sin embargo, si se busca cuantificar las posibles reducciones de CO<sub>2</sub>, se requerirá un enfoque cuantitativo.

## 4.1.2 INSPECCIÓN INTERNA O EXTERNA

la inspección externa es el método más sencillo de implementar. Consiste en capturar imágenes térmicas de toda la envoltura del edificio desde el exterior. Sin embargo, este enfoque puede verse afectado por las condiciones ambientales en el momento de la inspección. Además, dependiendo de la construcción del edificio, algunos defectos de construcción pueden no ser evidentes en imágenes tomadas desde el exterior. Por ejemplo, los defectos en el aislamiento del ático en una casa con tejado a dos aguas solo pueden detectarse mediante un estudio interno o con termografía aérea.

Por otro lado, la inspección interna se ve menos afectada por las condiciones ambientales. En este caso, se lleva a cabo dentro del edificio y se beneficia de una temperatura del aire y corrientes convectivas más estables. Esto permite realizar evaluaciones cuantitativas más precisas. Sin embargo, este enfoque requiere más tiempo, más imágenes y puede tener limitaciones en el ángulo de la lente utilizada.

La elección entre inspección externa, interna o ambas dependerá de los objetivos específicos de la inspección, las características del edificio y las condiciones ambientales en el momento de la evaluación.

## 4.1.3 DEFECTOS DETECTABLES

### 4.1.3.1 DEFECTO DE AISLAMIENTO

La termografía es una herramienta excepcional para detectar defectos en la construcción, como la falta de aislamiento, delaminación de cubiertas y problemas de condensación.

Para utilizar una cámara termográfica y localizar problemas de aislamiento o pérdidas de energía, se recomienda que exista una diferencia de temperatura de al menos 10 °C entre el interior y el exterior del edificio. Sin embargo, si se utiliza una cámara termográfica con imágenes de alta resolución y alta sensibilidad térmica, esta diferencia de temperatura puede ser menor.

En climas fríos, las inspecciones de edificios suelen realizarse en invierno. En cambio, en climas más cálidos, donde es importante verificar si el edificio está bien aislado para mantener el aire frío generado por los sistemas de climatización en su interior, los meses de verano son ideales para realizar este tipo de inspecciones termográficas.

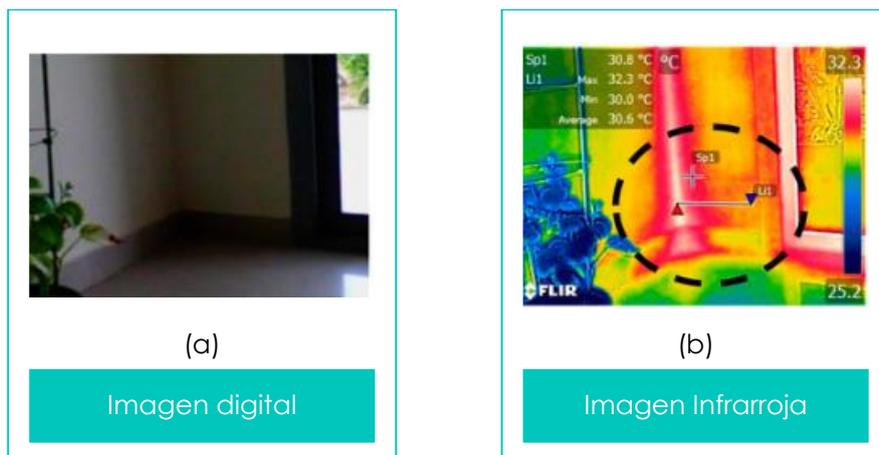


Figura 4.1.1: Imagen digital (a) e infrarroja (b) de un defecto de aislamiento. [15]

### 4.1.3.2 FUGAS DE AIRE

Las fugas de aire son problemáticas, ya que no solo aumentan el consumo de energía, sino que también pueden afectar al sistema de ventilación y provocar condensación en la estructura, lo que afecta al ambiente interior.

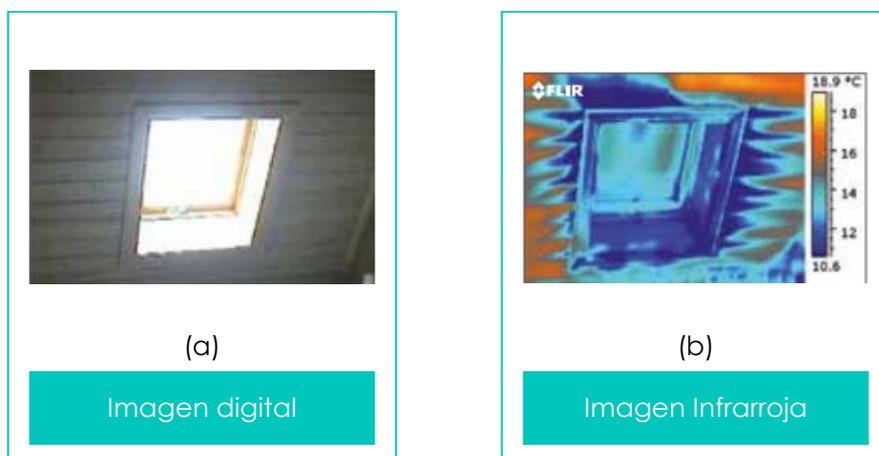


Figura 4.1.2: Imagen digital (a) e infrarroja (b) de fugas de aire entre techo y ventana. [16]

Para detectar fugas de aire utilizando una cámara termográfica, se requiere una diferencia de temperatura y presión. Con esta herramienta, es posible identificar los patrones característicos que se producen cuando el aire frío ingresa a través de una fuga en la construcción, enfriando la superficie por la que pasa. Es importante realizar la inspección termográfica en el lado de la construcción con presión negativa.

La detección de fugas de aire generalmente se realiza utilizando el método de presurización, conocido como la prueba de "Blower-Door".

### 4.1.3.3 DETECCIÓN DE HUMEDAD

Los daños causados por la humedad son comunes y pueden deteriorar un edificio. Las fugas de aire pueden provocar la formación de condensación en paredes, techos y tejados. El aislamiento húmedo tarda mucho tiempo en secarse y se convierte en un ambiente propicio para el crecimiento de moho y hongos.

Una exploración con una cámara termográfica puede localizar la humedad que propicia el desarrollo de moho. Aunque el olor puede indicar su presencia, es difícil determinar su ubicación exacta. Una inspección termográfica permite identificar las áreas húmedas que pueden generar graves problemas de salud.



Figura 4.1.3: Imagen infrarroja de una filtración de humedad en el suelo. [16]

Detectar la humedad puede ser complicado, pero el truco consiste en provocar cambios de temperatura en la estructura. Los materiales con humedad se destacarán claramente, ya que su temperatura cambia más lentamente que los materiales secos. A diferencia de otros métodos que miden la temperatura de un punto específico, las cámaras termográficas pueden escanear rápidamente una zona completa.

### 4.1.3.4 PUENTES TÉRMICOS

Otra aplicación importante de la termografía en la construcción es la localización de puentes térmicos. Estos puentes térmicos son puntos en el edificio donde se está desperdiciando energía debido a una menor resistencia térmica en la envolvente del edificio. Estos puentes térmicos son causados por

limitaciones en la construcción, lo que hace que el calor siga la ruta más fácil desde el espacio calentado al exterior.

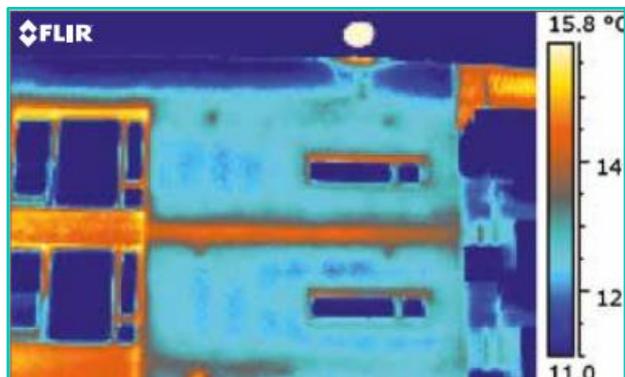


Figura 4.1.4: Puente térmico en uno de los pisos. [16]

Los puentes térmicos pueden tener varios efectos negativos en los edificios, incluyendo temperaturas más bajas en la superficie interior, lo que puede resultar en problemas de condensación, especialmente en las esquinas. También pueden provocar pérdidas de calor significativamente mayores y la formación de áreas frías en el edificio.

Mediante la termografía, es posible identificar y localizar estos puentes térmicos, lo que permite tomar medidas correctivas para mejorar la eficiencia energética del edificio y reducir las pérdidas de calor. Esta información es valiosa para los propietarios de edificios, ya que les permite tomar decisiones informadas sobre las mejoras necesarias en la envolvente del edificio para evitar los efectos negativos de los puentes térmicos.

#### 4.1.3.5 LÍNEAS DE ABASTECIMIENTO Y CALEFACCIÓN CENTRAL

En climas fríos, es común que el pavimento y las zonas de aparcamiento se calienten para evitar la formación de hielo y mejorar la seguridad. Por otro lado, los sistemas de calefacción central distribuyen calor, y en algunos casos vapor, desde una ubicación centralizada hacia hogares y establecimientos comerciales.

En el caso de los sistemas de calefacción subterráneos, una inspección termográfica puede resultar de gran utilidad. Mediante el uso de una cámara termográfica, es posible detectar fácilmente cualquier defecto en las tuberías y conductos de estos sistemas. La termografía permite identificar la ubicación exacta del problema, lo que facilita las reparaciones y minimiza los costos asociados.

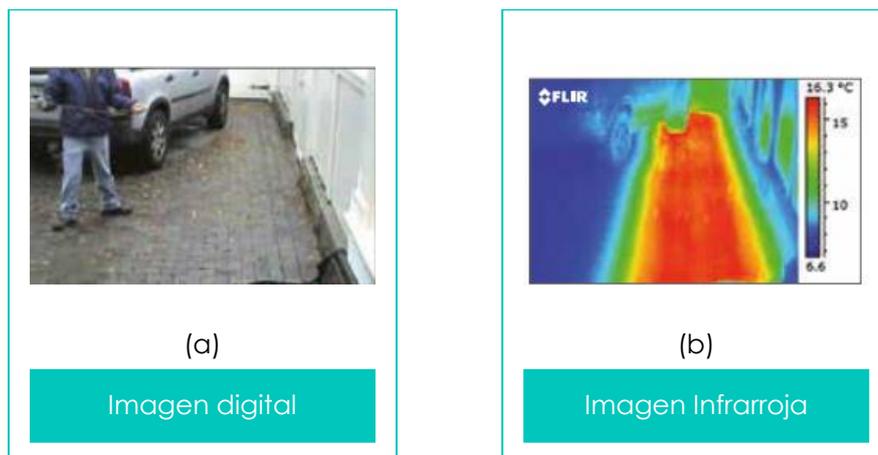


Figura 4.1.5: Imagen digital (a) e infrarroja (b) de defectos en sistemas de calefacción central. [16]

Al utilizar una cámara termográfica, los técnicos pueden visualizar las diferencias de temperatura en la superficie del pavimento, las zonas de aparcamiento y los conductos subterráneos de calefacción. Esto les permite identificar áreas problemáticas y puntos de fuga de calor, lo que a su vez ayuda a optimizar el rendimiento del sistema y evitar pérdidas innecesarias de energía.

#### 4.1.3.6 FILTRACIONES DE AGUA EN TEJADOS PLANOS

La termografía es una herramienta efectiva para detectar filtraciones de agua en techados planos. Debido a que el agua retiene el calor más tiempo que otros materiales, es posible identificar su presencia utilizando una cámara termográfica durante las últimas horas de la tarde y por la noche, cuando el tejado ya se ha enfriado.

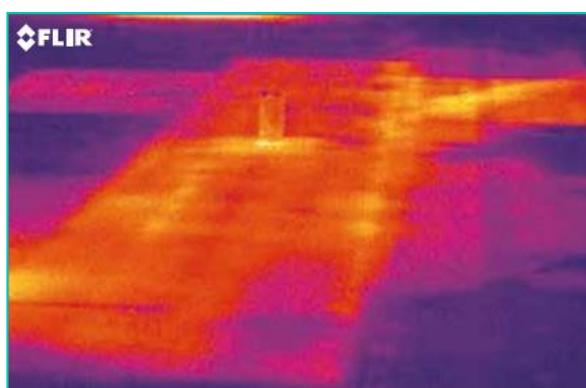


Figura 4.1.6: Imagen infrarroja de filtraciones en un tejado plano. [16]

Al realizar una inspección termográfica en estas condiciones, se pueden observar diferencias de temperatura que indican la presencia de filtraciones de agua. Las áreas afectadas se mostrarán como manchas más frías en la imagen térmica, lo que permite localizar los puntos exactos donde se produce la filtración.

Detectar y reparar zonas húmedas en lugar de tener que reemplazar todo el tejado puede suponer un ahorro significativo en términos de costos de reparación. Al utilizar la termografía, los profesionales pueden focalizar sus esfuerzos en las áreas problemáticas, evitando gastos innecesarios y prolongando la vida útil del tejado.

La detección temprana de filtraciones de agua mediante la termografía ayuda a prevenir daños adicionales en la estructura del edificio, como la proliferación de moho o la degradación de materiales. Además, permite tomar medidas correctivas de manera oportuna, lo que resulta en un ahorro considerable a largo plazo.

#### 4.1.3.7 FUGAS DE CALEFACCIÓN DE SUELO

La termografía es una herramienta efectiva y sencilla para detectar fugas en tuberías y conductos, incluso cuando están ubicados en el suelo o debajo de capas de yeso u otros materiales.

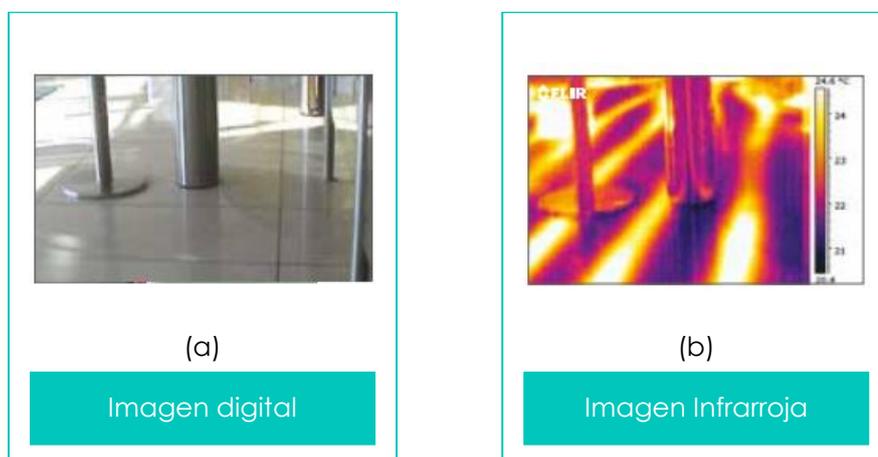


Figura 4.1.7: Imagen digital (a) e infrarroja (b) de un suelo radiante. [17]

Cuando las tuberías tienen fugas, el calor que generan se irradia a través de la superficie, creando patrones de temperatura distintivos. Estos patrones se pueden detectar fácilmente utilizando una cámara termográfica. Al capturar imágenes térmicas de las tuberías, se pueden identificar áreas donde se produce una anomalía térmica, lo que indica la presencia de una fuga.

La ventaja de utilizar la termografía en la detección de fugas en tuberías es que no es necesario acceder físicamente a las tuberías o realizar excavaciones. La cámara termográfica puede capturar la radiación infrarroja emitida por las tuberías a través de las capas superficiales, lo que permite localizar la fuente de la fuga sin necesidad de interrumpir o desmantelar la estructura circundante.

Al detectar y localizar las fugas de manera temprana con la termografía, se pueden tomar medidas correctivas rápidas para evitar daños mayores, como la aparición de humedad o la degradación de los materiales circundantes. Esto no solo ayuda a prevenir costosas reparaciones, sino que también contribuye a mantener la integridad de las instalaciones y a conservar recursos hídricos.

#### 4.1.3.8 CONTROL DE CALIDAD

La tecnología termográfica es ampliamente utilizada en el control de calidad y la inspección de edificios nuevos. Una de las aplicaciones clave es durante el proceso de secado de la construcción. La termografía permite determinar el progreso de los procedimientos de secado, lo que facilita la toma de medidas necesarias para acelerar el proceso.

Al utilizar una cámara termográfica, se pueden identificar áreas húmedas o con niveles de humedad inadecuados en la construcción. Esto es especialmente útil en la detección de humedad atrapada en estructuras o en materiales de construcción, como paredes, techos o pisos. La termografía permite visualizar y evaluar el grado de sequedad de la construcción, lo que proporciona información precisa sobre su estado.

Si el proceso de secado se puede acelerar y se demuestra, mediante el uso de una cámara termográfica, que la construcción está completamente seca, se puede entregar el edificio antes al cliente. Esto es beneficioso tanto para el constructor como para el cliente, ya que se reduce el tiempo de finalización del proyecto y se garantiza que la construcción esté en óptimas condiciones antes de su entrega.

Además, la termografía se utiliza en la inspección de edificios nuevos para verificar la calidad de la construcción y detectar posibles defectos o problemas. La cámara termográfica puede revelar irregularidades en el aislamiento, infiltraciones de aire, problemas de conductividad térmica y otros defectos que pueden afectar el rendimiento energético y el confort del edificio.

### 4.1.3.9 REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS

La termografía desempeña un papel importante durante la rehabilitación de edificios y monumentos, ya que proporciona información valiosa sobre las estructuras ocultas por yeso u otros materiales de revestimiento. Mediante una termografía, es posible visualizar con claridad estas estructuras internas, lo que permite tomar decisiones informadas sobre si vale la pena sacar a la luz estas estructuras durante el proceso de rehabilitación.

Además, la termografía es una herramienta eficaz para detectar el desprendimiento del yeso de las paredes en una etapa muy temprana. Al identificar a tiempo los puntos de desprendimiento del yeso, se pueden tomar medidas de conservación y realizar las reparaciones necesarias de manera oportuna. Esto ayuda a prevenir daños mayores y a garantizar la estabilidad y la integridad de las superficies.

### 4.1.3.10 TUBERÍAS

La termografía es una herramienta altamente efectiva para detectar tuberías bloqueadas, rotas u otros problemas relacionados. Incluso cuando las tuberías están ubicadas bajo el suelo o dentro de una pared, es posible determinar la ubicación precisa del problema mediante el método de pasar agua caliente por ellas. El calor generado por el agua se irradiará a través de la superficie, lo que permitirá identificar claramente la zona problemática mediante una termografía.

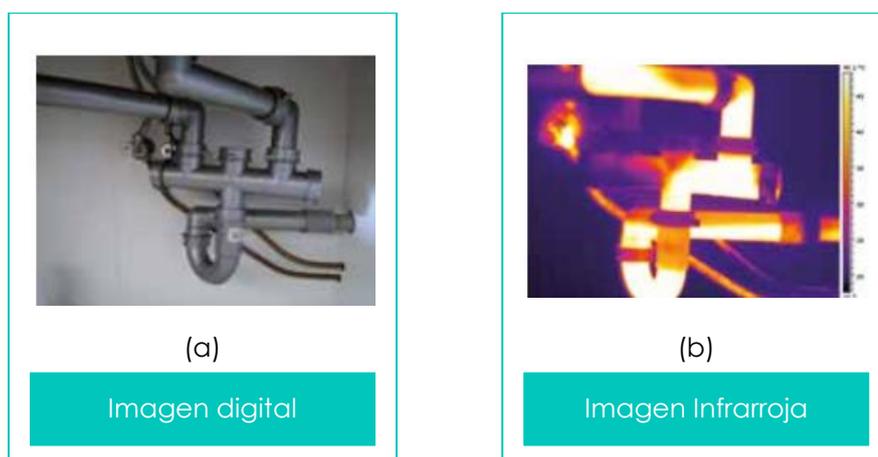


Figura 4.1.8: Imagen digital (a) e infrarroja (b) de una tubería con problemas. [16]

Esta capacidad de la termografía para visualizar el calor radiante facilita la detección de tuberías bloqueadas, fugas o daños estructurales en el sistema de tuberías. Al identificar de manera precisa la

ubicación del problema, se pueden tomar las medidas necesarias para su reparación o reemplazo de manera eficiente, minimizando el tiempo y los costos asociados.

#### **4.1.3.11 INSTALACIONES DE CLIMATIZACIÓN**

Los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) desempeñan un papel crucial en el suministro de aire con las condiciones adecuadas de humedad, temperatura y limpieza en los espacios interiores. Un mantenimiento adecuado de estos sistemas es fundamental para garantizar un ambiente saludable y confortable.

La termografía se presenta como una herramienta útil para detectar posibles problemas en los sistemas de climatización y evaluar su funcionamiento. Mediante el uso de una cámara termográfica, es posible identificar anomalías en la distribución del aire, como fugas en conductos, obstrucciones o desequilibrios en el flujo de aire. Estos problemas pueden afectar negativamente la eficiencia energética del sistema y comprometer la calidad del aire interior.

La detección temprana de fallas en los sistemas HVAC mediante termografía permite tomar medidas correctivas de manera oportuna. Esto no solo ayuda a mantener un rendimiento óptimo del sistema, sino que también contribuye a garantizar una mejor calidad del aire interior, evitando la propagación de contaminantes y alérgenos.

#### **4.1.4 RECOMENDACIONES PARA LLEVAR A CABO UNA INSPECCIÓN RESIDENCIAL MEDIANTE TERMOGRAFÍA INFRARROJA**

Para realizar una inspección eficaz de un edificio utilizando termografía infrarroja, es importante seguir una serie de pasos y prácticas recomendadas. A continuación, se enumeran las mejores prácticas para la preparación y ejecución de una inspección con infrarrojos:

- Realizar una inspección visual tanto del interior como del exterior del edificio. Tomar nota de cualquier problema inusual o áreas potencialmente problemáticas.
- Confirmar que existan diferencias de temperatura (delta T) de al menos 10 °C (18 °F) entre las superficies interiores y exteriores (o asegurarse de que la inspección de conducción se pueda llevar a cabo con diferencias de temperatura menores). Es recomendable que estas diferencias de temperatura se mantengan de manera estable durante un período de al menos cuatro horas.
- Registrar la temperatura y la humedad del aire interior.

- Registrar la temperatura y la humedad del aire exterior.
- Registrar la dirección y velocidad del viento exterior.
- Registrar cualquier otro factor ambiental relevante, como precipitaciones, posición del sol, etc. Estos factores pueden limitar la capacidad para realizar una inspección eficaz con termografía infrarroja en ciertas áreas.
- Asegurarse de cerrar todas las puertas, ventanas y otros elementos exteriores que formen parte del cerramiento del edificio.
- Abrir todas las puertas interiores.
- Verificar que los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado estén apagados durante al menos 15 minutos antes de la inspección.
- Realizar una inspección sistemática del interior de la residencia para detectar problemas de conducción (aislamiento, puentes térmicos, etc.). Tomar notas de todas las anomalías o patrones térmicos inesperados.
- Si las condiciones lo permiten, llevar a cabo una inspección sistemática del exterior de la residencia para detectar problemas de conducción (aislamiento, puentes térmicos, etc.) e, idealmente, en condiciones atmosféricas adversas. Registrar cualquier anomalía o patrón térmico inesperado.
- Asegurarse de que todos los dispositivos de combustión (hornos, estufas, calentadores, etc.) estén completamente apagados. Si hay una chimenea, cubrir las cenizas con papel mojado u otra forma de evitar la expansión del calor.
- Instalar adecuadamente una puerta de ventilación.
- Despresurizar la residencia a aproximadamente 20 pascales.
- Realizar una inspección sistemática del interior de la residencia para detectar filtraciones de aire (asumiendo un  $\Delta T$  de aproximadamente 5 °C o confirmando que la inspección se puede realizar de manera razonable). Tomar nota de cualquier anomalía, derivaciones de aire intersticiales o áreas de filtración de aire hacia el interior.

- Invertir la dirección de la puerta de ventilación y/o presurizar la casa a aproximadamente 20 pascales.
- Realizar una inspección sistemática del exterior de la residencia para detectar filtraciones de aire (asumiendo un delta T de aproximadamente 5 °C o confirmando que la inspección se puede realizar de manera razonable). Registrar cualquier anomalía, derivaciones de aire o áreas de filtración de aire hacia el exterior.

#### **4.1.5 BLOWER DOOR**

El ensayo de “blower-door”, desarrollado en Suecia en 1975 y ampliamente utilizado en Europa y Estados Unidos desde hace décadas, es una prueba no destructiva que permite medir el volumen de infiltraciones no deseadas y localizar puntos de filtración para su sellado. Este ensayo es un requisito fundamental en el estándar Passivhaus, cumple con la norma EN 13829 y se encuentra reconocida como norma tecnológica desde 1998 y su finalidad es evaluar la estanqueidad de la envolvente de un edificio.

Mediante el ensayo de blower-door, se pueden obtener mediciones de las renovaciones de aire por hora debido a la falta de estanqueidad y se pueden identificar las infiltraciones para tomar medidas de sellado. Esto evita consumos energéticos causados por infiltraciones y corrientes de aire, la entrada de olores, humos y contaminantes, condensaciones intersticiales en los cerramientos, la formación de moho, y reduce los puentes térmicos y acústicos.

Este ensayo mejora la calificación energética del edificio, aumenta el rendimiento de los sistemas de climatización, prolonga la vida útil de los aislamientos, suprime corrientes de aire no deseadas, limita daños estructurales debidos a la humedad y ofrece una prueba confiable de calidad de la envolvente, lo que aumenta el valor de la propiedad.



Figura 4.1.9: Medición Blower Door. [18]

Para realizar la medición, se instala un ventilador en una puerta o ventana exterior del edificio que se desea inspeccionar. Es importante asegurarse de que el resto de las puertas y ventanas exteriores del edificio permanezcan cerradas, mientras que las puertas interiores permanecen abiertas. El ventilador es utilizado para determinar el intercambio de aire del edificio, lo que se conoce como la tasa de renovación de aire. Este proceso implica aumentar o disminuir la presión interior del edificio, lo que proporciona información valiosa sobre las infiltraciones presentes en la envolvente del edificio. Durante la medición, se pueden detectar y eliminar las infiltraciones, contribuyendo así a mejorar la eficiencia energética y el confort interior del edificio.

Los ventiladores utilizados en este tipo de medición tienen diferentes rangos de actuación, que generalmente oscilan entre los 19 m<sup>3</sup>/h y los 7.200 m<sup>3</sup>/h. Además, existe la posibilidad de combinar varios sistemas de ventiladores para abarcar diferentes áreas o condiciones específicas del edificio.

Las infiltraciones suelen localizarse con mayor frecuencia en diversos puntos de la estructura del edificio, entre los cuales se destacan:

- Uniones y juntas en elementos constructivos
- Penetración de tuberías y cables a través de la barrera de aire y/o muros
- Conexiones de diferentes materiales
- Ampliaciones de edificios

- Miradores
- Jambas de ventanas y puertas exteriores
- Claraboyas
- Buhardillas
- Trampillas

#### 4.1.5.1 BLOWER DOOR RESIDENCIAL

El Código Técnico de la Edificación de 2014 establece en el documento DB HE O una limitación estricta en la demanda energética de edificios nuevos o renovados. Dependiendo de la zona climática, esta demanda máxima se fija en 15 kWh/m<sup>2</sup> año tanto para calefacción como para refrigeración, igualando así al estándar Passivhaus. Para alcanzar estos niveles de eficiencia energética, es crucial controlar los puentes térmicos y las infiltraciones de aire en la envolvente del edificio.

La estanqueidad al aire de un edificio se refiere a su capacidad para evitar la circulación no controlada de aire. Los usuarios deben contar con una envolvente estanca que los proteja de las condiciones ambientales adversas, y tener la capacidad de controlar la ventilación independientemente de dichas condiciones. Por ejemplo, en invierno, el aire caliente tiende a escapar al exterior por las aberturas superiores, mientras que el aire frío del exterior ingresa por las aberturas inferiores, generando cargas térmicas no deseadas. Sin conocer el volumen de aire involucrado, resulta difícil calcular los costos energéticos asociados a la eficiencia del edificio. Las infiltraciones de aire también pueden ocasionar problemas como condensación, ingreso de olores, humo, polen y ruido, además de aumentar el riesgo de propagación de incendios.

La estanqueidad de la envolvente desempeña un papel fundamental en la eficiencia energética, ya que las infiltraciones de aire provocan una pérdida significativa de aire acondicionado, lo cual requiere un consumo adicional de energía para mantener la temperatura de confort. Un buen diseño no es suficiente, es necesaria una correcta ejecución y montaje de los elementos de la envolvente para garantizar el sellado hermético.

#### 4.1.5.2 BLOWER DOOR PARA PASSIVHAUS

El estándar Passivhaus es reconocido por ser un enfoque de construcción que se centra en la eficiencia energética y el confort en los edificios. Con más de 20 años de experiencia y más de 25.000 edificios construidos siguiendo este estándar en todo el mundo, ha demostrado ser exitoso. Aunque en España su adopción es relativamente más reciente, la construcción de edificios bajo este estándar está aumentando en popularidad.

El estándar Passivhaus se basa en criterios de diseño como:

- Aislamiento térmico
- Inercia térmica, ausencia de puentes térmicos
- Ventanas de alta eficiencia,
- Estanqueidad
- Ventilación controlada y con recuperación de calor,

La estanqueidad es un factor clave para obtener la certificación Passivhaus, ya que las infiltraciones de aire afectan al consumo energético, aumentan el riesgo de condensaciones y moho, y generan corrientes de aire no deseadas que afectan al confort. Para verificar la estanqueidad, se utiliza el test Blower Door según la norma EN 13829 (método A), realizando pruebas tanto en depresión como en sobrepresión. Es importante que el test sea llevado a cabo por una empresa o profesional independiente del cliente y contratista, con experiencia en la construcción Passivhaus.

#### 4.1.5.3 BLOWER DOOR PARA GRANDES EDIFICIOS

Para realizar la prueba de estanqueidad, se determina el volumen del edificio y sus requisitos de estanqueidad, en caso de estar definidos. A partir de esta información, se calcula el número de ventiladores necesarios para cumplir con la norma EN 13829.

Aunque el procedimiento es similar, medir la estanqueidad en grandes edificios puede implicar cierta complejidad adicional. Se pueden realizar pruebas de despresurización, presurización o ambos, y se utilizan diversas técnicas como cámaras térmicas, termoanemómetros, máquinas de humo u otras herramientas para localizar las entradas de aire.

El sellado del edificio en este caso requiere más trabajo, ya que en los grandes edificios hay sistemas de climatización complejos con suministro de aire exterior, grandes espacios de instalaciones, huecos de ascensores y otros puntos de conexión con el exterior que deben ser sellados antes de iniciar el test.

Generalmente, es común realizar el test de estanqueidad en la etapa de construcción, tanto en edificios nuevos como en rehabilitaciones. Puede llevarse a cabo en una parte específica del edificio, como una planta, o en todo el edificio en su conjunto. Por lo general, se realiza durante los fines de semana para evitar interferencias con el trabajo del resto del personal de la obra.

#### 4.1.5.4 BLOWER DOOR PARA EVALUACIÓN DE ESTANQUEIDAD

La prueba de estanqueidad, también conocida como Blower Door, es necesaria para evaluar la estanqueidad de la envolvente de una vivienda o edificio. Aunque su demanda va en aumento, aún no es ampliamente conocida en España. Sin embargo, en los edificios de consumo nulo o casi nulo (NZEB o EECN) y en el estándar Passivhaus, esta prueba es obligatoria. También se requiere en los sellos de construcción BREEAM y LEED.

Aunque actualmente no es un requisito de nuestra normativa (CTE), cada vez más empresas optan por realizar esta prueba durante la fase de construcción para garantizar la calidad de la vivienda. La normativa que regula esta prueba es la UNE EN 13829. A diferencia de España, en muchos países de la Unión Europea es obligatoria y debe ser realizada por una empresa externa cualificada.

Es probable que este requisito se incluya en nuestra legislación en el futuro, lo que dará ventaja competitiva a las empresas que ya están familiarizadas con la estanqueidad de la envolvente. En Ebuilding, llevamos realizando estas pruebas desde 2011 y estamos acreditados por Blower Door Academy para certificar la estanqueidad en edificios pequeños y grandes, según las normas EN 13829 e ISO 9972.

En los años 80, se descubrió que muchos sistemas de protección contra incendios con Halón 1301 no eran efectivos debido a la falta de estanqueidad en los recintos. Para garantizar su eficacia, se implementó la prueba de descarga real y medición de la concentración. Sin embargo, la preocupación por la destrucción de la Capa de Ozono llevó a la supresión de las descargas innecesarias de CFCs, lo que hizo imposible realizar estas pruebas. Como alternativa, surgió la prueba de estanqueidad de recintos o ensayo Blower-Door.

El estándar NFPA 12A de 1989 introdujo por primera vez la prueba de estanqueidad con Blower-Door, y el estándar NFPA 2001, aplicable a sistemas de extinción de incendios con agentes limpios, requiere esta prueba como parte del procedimiento de aceptación. La prueba de estanqueidad es más conservadora que la prueba de descarga real y es especialmente importante al trabajar con agentes limpios debido a su menor eficacia en comparación con el Halón 1301. En entornos como quirófanos y salas blancas, se requiere una alta estanqueidad para mantener la higiene y la calidad del aire.

El ensayo Blower-Door simula las condiciones de una descarga real del agente extintor, pero sin los inconvenientes asociados. Mide el tamaño de las fugas en el recinto y la presión generada a través de las paredes. Se utiliza un ventilador monitorizado para crear una presión similar a la generada por la mezcla aire-gas extintor después de la descarga. Con software especializado, se simula y predice el tiempo de retención según modelos matemáticos aceptados. Esta prueba reemplaza las pruebas de descarga o inundación y ofrece un método rápido, fiable y económico para evaluar la estanqueidad.

## 4.2 MANTENIMIENTO PREDICTIVO

La tecnología termográfica se ha convertido en una herramienta esencial en el ámbito de la ingeniería para el mantenimiento predictivo. Mediante la detección de anomalías que son difíciles de detectar a simple vista, la termografía brinda la oportunidad de abordar y corregir problemas antes de que se conviertan en fallos costosos para el sistema.

En este sentido, las cámaras termográficas son herramientas invaluableles para determinar cuándo y dónde se requiere realizar labores de mantenimiento. Es ampliamente reconocido que tanto las instalaciones eléctricas como las mecánicas tienden a generar calor antes de presentar fallos. Al utilizar cámaras termográficas para identificar estos puntos calientes, es posible adoptar medidas preventivas y evitar averías costosas, e incluso situaciones más graves como incendios.

Las cámaras termográficas son instrumentos confiables y de gran potencia que permiten analizar y visualizar con precisión la distribución de la temperatura en superficies completas de equipos eléctricos y maquinaria. Gracias a la implementación de programas de termografía, nuestros clientes en todo el mundo han logrado obtener ahorros significativos en los costos de mantenimiento.

Es importante destacar que diversas industrias a nivel mundial han reconocido los beneficios de incorporar cámaras infrarrojas en sus programas de mantenimiento predictivo. Esto demuestra la

relevancia y eficacia de la termografía en el ámbito de la ingeniería y su capacidad para mejorar la eficiencia y la seguridad en los procesos de mantenimiento.

Para llevar a cabo inspecciones de mantenimiento predictivo utilizando cámaras termográficas, es fundamental tener en cuenta diversos detalles. Además de comprender el funcionamiento de estas cámaras y cómo capturar imágenes, es esencial tener conocimientos sobre la física de la instalación eléctrica o mecánica que se está inspeccionando, así como comprender su estructura. Todos estos aspectos son necesarios para comprender, interpretar y evaluar de manera precisa las imágenes termográficas obtenidas.

La termografía infrarroja es una técnica complementaria para la toma de decisiones en el mantenimiento, especialmente cuando se trata de detectar comportamientos anormales en piezas o componentes de equipos y sistemas. Sin embargo, también es importante considerar otras técnicas de mantenimiento que pueden utilizarse en conjunto con la termografía infrarroja. Algunas de estas técnicas son:

- **Análisis de lubricantes:** Permite evaluar la calidad y las características del lubricante utilizado en los equipos, identificando posibles problemas de desgaste, contaminación o falta de lubricación adecuada.
- **Análisis de vibraciones:** Mediante la medición y el análisis de las vibraciones generadas por los equipos, es posible detectar desequilibrios, desalineaciones, holguras o problemas en los rodamientos, lo cual puede indicar un comportamiento anormal.
- **Ultrasonidos:** Esta técnica se utiliza para detectar fugas de gases o líquidos, así como para identificar posibles problemas en la maquinaria mediante la detección de sonidos ultrasónicos generados por el flujo de fluidos o por la fricción.
- **Ensayos radiográficos:** Se utilizan radiografías para evaluar la integridad y la calidad de las estructuras internas de los equipos, como soldaduras, tuberías o componentes metálicos, en busca de posibles defectos o anomalías.
- **Tintas penetrantes:** Esta técnica se emplea para detectar fisuras o defectos en la superficie de los materiales mediante la aplicación de tintas que penetran en esas irregularidades y luego se eliminan, revelando así los defectos ocultos.

- **Partículas magnéticas:** Se utiliza para inspeccionar componentes metálicos en busca de grietas o defectos superficiales mediante la aplicación de partículas magnéticas y la creación de un campo magnético.
- **Corrientes inducidas:** Esta técnica se basa en la detección de cambios en las corrientes eléctricas generadas por defectos, como grietas o corrosión, en materiales conductores.

Estas técnicas, junto con la termografía infrarroja, proporcionan un enfoque integral para el mantenimiento predictivo, permitiendo detectar y diagnosticar problemas de manera más precisa y tomar decisiones informadas en cuanto a la planificación y ejecución de acciones de mantenimiento.

La termografía infrarroja en el mantenimiento predictivo ofrece una amplia gama de beneficios que contribuyen al mejor funcionamiento y rendimiento de los equipos. Estos beneficios incluyen:

1. **Mejora indirecta en el área de producción y calidad:** La reducción de paradas no programadas mediante la termografía infrarroja resulta en una mayor productividad y uniformidad en los productos, lo que se traduce en una mejora en la eficiencia general de la producción.
2. **Reducción del tiempo de revisión de equipos en buenas condiciones:** Mediante la termografía infrarroja, es posible identificar rápidamente los equipos y componentes en buen estado, lo que reduce el tiempo requerido para la revisión y permite focalizar los esfuerzos de mantenimiento en aquellos elementos que realmente necesitan atención.
3. **Identificación y monitoreo de problemas no críticos:** La termografía infrarroja permite detectar problemas incipientes o no críticos en los equipos, lo que facilita su monitoreo durante un período de tiempo determinado y permite realizar reparaciones programadas, evitando así fallos inesperados y costosos.
4. **Reducción del riesgo de fallos no detectables por análisis convencionales:** La termografía infrarroja puede identificar fallos o problemas que no son detectables mediante técnicas de análisis convencionales, lo que reduce el riesgo de fallos catastróficos y costosos.
5. **Inspección sin contacto y seguridad del personal:** Durante la inspección termográfica, no es necesario realizar contacto físico con el equipo o las instalaciones, lo que garantiza la seguridad del personal. Además, la capacidad de medir y registrar temperaturas a distancia y de manera casi instantánea evita interrupciones en las operaciones y minimiza el riesgo para los operarios.

- 6. Establecimiento de tendencias y evolución al fallo:** La termografía infrarroja permite realizar un seguimiento del comportamiento y la evolución de los equipos a lo largo del tiempo, lo que facilita la detección temprana de posibles fallos y la planificación de acciones de mantenimiento preventivo.
- 7. Reducción del tiempo de reparación:** Gracias a la localización precisa de los fallos proporcionada por la termografía infrarroja, se reduce el tiempo requerido para realizar reparaciones, lo que disminuye las interrupciones en la producción y aumenta la eficiencia del proceso de mantenimiento.
- 8. Prolongación de la vida útil de los activos físicos:** Al detectar y corregir problemas de forma temprana, la termografía infrarroja contribuye a prolongar la vida útil de los equipos, lo que maximiza su utilización y evita costosos reemplazos prematuros.
- 9. Reducción de tiempos de parada en la producción:** La termografía infrarroja ayuda a prevenir fallos inesperados y problemas derivados de un mal funcionamiento progresivo, lo que reduce los tiempos de parada en la producción y maximiza la productividad.
- 10. Evaluación de la calidad del trabajo de reparación:** Comparando las temperaturas de funcionamiento antes y después de realizar una reparación, es posible determinar la eficacia y calidad del trabajo realizado, asegurando un correcto funcionamiento de los equipos.
- 11. Reducción de pérdidas de energía en forma de calor:** La termografía infrarroja permite identificar y corregir fugas de energía en forma de calor, lo que contribuye a una mayor eficiencia energética y ahorro de costos.
- 12. Recuperación rápida de la inversión:** Si se realiza una buena planificación y utilización del equipo termográfico, la inversión inicial se puede recuperar en poco tiempo debido a los ahorros en costos de mantenimiento y la mejora en la eficiencia operativa.
- 13. Generación de informes precisos:** La termografía infrarroja facilita la generación de informes detallados y precisos para el personal de mantenimiento, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones y la planificación de acciones correctivas.

## 4.2.1 SISTEMAS ELÉCTRICOS

Una de las ventajas más notables de la termografía es su capacidad para llevar a cabo inspecciones en sistemas eléctricos mientras están en pleno funcionamiento. Al ser un método de diagnóstico no intrusivo, el termógrafo puede examinar de manera rápida y segura componentes específicos de un equipo desde una distancia segura. Posteriormente, puede retirarse de la zona de riesgo y analizar los datos obtenidos en su oficina sin exponerse a ningún peligro.

Esta capacidad de realizar inspecciones sin contacto directo con los sistemas eléctricos ofrece diversos beneficios. En primer lugar, se elimina el riesgo de accidentes o lesiones al evitar la necesidad de intervenir físicamente en el equipo. Además, se evitan interrupciones innecesarias en la operación de los sistemas, lo que resulta especialmente valioso en entornos industriales donde el tiempo de inactividad puede tener un impacto significativo en la producción.

La termografía permite identificar problemas potenciales, como sobrecalentamientos, puntos calientes o conexiones defectuosas, antes de que se conviertan en fallos catastróficos. Al obtener imágenes termográficas precisas y detalladas, se pueden detectar anomalías térmicas y tomar medidas correctivas de manera oportuna. Esto no solo ayuda a prevenir fallos y reducir el tiempo de inactividad, sino que también contribuye a mantener la eficiencia y seguridad de los sistemas eléctricos.

La versatilidad de estas cámaras permite aplicarlas en una amplia variedad de situaciones relacionadas con sistemas eléctricos, dividiéndolas en dos categorías principales: instalaciones de alta tensión y de baja tensión.

En el caso de las instalaciones de alta tensión, las cámaras termográficas se utilizan para inspeccionar componentes como transformadores, interruptores, cables de alta tensión y subestaciones. Estas inspecciones permiten detectar problemas como puntos calientes, sobrecalentamientos, conexiones defectuosas o desgaste en los componentes, que podrían dar lugar a fallos graves o incluso incendios.

Por otro lado, en las instalaciones de baja tensión, las cámaras termográficas se emplean para inspeccionar paneles eléctricos, cuadros de distribución, motores, sistemas de iluminación, conexiones y dispositivos eléctricos en general. Estas inspecciones permiten identificar anomalías térmicas, como conexiones flojas, circuitos sobrecargados o problemas de disipación de calor, que podrían causar fallos y afectar la eficiencia y seguridad del sistema eléctrico.

#### 4.2.1.1 INSTALACIONES DE ALTA TENSIÓN

En las instalaciones de alta tensión, el calor juega un papel crucial. Cuando la corriente eléctrica pasa a través de un elemento resistivo, se genera calor. Cuanto mayor sea la resistencia, mayor será la generación de calor.

Con el tiempo, las conexiones eléctricas pueden experimentar un aumento de resistencia debido a factores como la holgura y la corrosión. Este aumento de resistencia conduce a un incremento de la temperatura, lo que puede provocar fallos en los componentes, cortes de tensión inesperados e incluso lesiones. Además, la energía empleada en generar calor provoca pérdidas de energía innecesarias. Si no se detecta y corrige, el calor puede acumularse hasta el punto de fundir las conexiones, causando averías y, en casos extremos, incendios.

La termografía infrarroja se ha consolidado como una herramienta eficaz en la detección de fallos en instalaciones de alta tensión. Mediante el uso de cámaras termográficas, es posible identificar diversas problemáticas que pueden surgir en estos sistemas. Algunos ejemplos incluyen la oxidación de interruptores de alta tensión, conexiones eléctricas recalentadas, conexiones mal aseguradas y defectos de aislamiento.

La principal ventaja de la termografía es su capacidad para realizar inspecciones en sistemas eléctricos mientras están en funcionamiento. Al ser un método de diagnóstico sin contacto, el termógrafo puede examinar de manera rápida y segura componentes específicos desde una distancia adecuada. Posteriormente, los datos recopilados pueden ser analizados en la oficina, evitando así cualquier exposición a riesgos potenciales.

La termografía permite detectar los problemas en una etapa temprana, lo que facilita una intervención oportuna y eficiente. Al localizar con precisión el problema, se puede determinar su gravedad y calcular el tiempo necesario para realizar la reparación correspondiente. De esta manera, se evitan fallos, interrupciones no planificadas y se garantiza la seguridad de las instalaciones.

#### 4.2.1.2 INSTALACIONES DE BAJA TENSIÓN

Las cámaras termográficas son herramientas valiosas para realizar inspecciones regulares en cuadros eléctricos y centros de control de motores en equipamiento de baja tensión. Además de detectar conexiones sueltas, es común que los sistemas eléctricos experimenten desequilibrios de carga, corrosión y aumentos de impedancia de corriente.

La termografía se ha convertido en una herramienta efectiva para la detección de fallos en el equipamiento de baja tensión. Mediante el uso de cámaras termográficas, es posible identificar una variedad de problemas que pueden comprometer el rendimiento y la seguridad del sistema. Algunos ejemplos de fallos que pueden ser detectados con termografía incluyen conexiones de alta resistencia, conexiones corroídas, daños internos en los fusibles, fallos internos en los disyuntores, así como malas conexiones y daños internos en general.

En el área eléctrica a un defecto se le suele denominar como un “punto caliente” y su detección se fundamenta en el sobrecalentamiento que un componente eléctrico experimenta cuando se genera un aumento de la resistencia eléctrica como consecuencia de un falso contacto, de suciedad corrosión, aumento de la resistencia eléctrica, sobrecargas o fallas de aislamiento. La principal función de la inspección termográfica es encontrar puntos calientes o fríos que representen una anomalía en las instalaciones eléctricas que pueden detectarse con la cámara de termografía.

#### **4.2.2 SISTEMAS MECÁNICOS**

Las cámaras termográficas son herramientas indispensables en numerosos sectores industriales, ya que permiten recopilar datos térmicos que brindan información complementaria para los estudios de vibración y la supervisión de los equipos mecánicos. Estos sistemas mecánicos son cruciales para el correcto funcionamiento de las operaciones diarias.

Uno de los problemas comunes en los sistemas mecánicos es el sobrecalentamiento causado por errores de alineamiento en puntos específicos del sistema. Por ejemplo, en el caso de las cintas transportadoras, es posible detectar claramente mediante termografía si un rodillo está desgastado, indicando la necesidad de reemplazo.

A medida que los componentes mecánicos se desgastan y pierden eficiencia, generan un mayor calor. Esto puede llevar a un rápido aumento de temperatura en los equipos o sistemas defectuosos antes de que ocurra una falla. Mediante la comparación periódica entre las lecturas termográficas y los perfiles de temperatura en condiciones normales de funcionamiento, es posible detectar una amplia gama de fallos.

La termografía proporciona una representación visual de las anomalías térmicas en los componentes mecánicos, como puntos calientes, áreas de fricción excesiva o desgaste anormal. Estos patrones

térmicos pueden indicar problemas como rodamientos defectuosos, falta de lubricación, alineamiento incorrecto, desgaste de engranajes o problemas en los sistemas de refrigeración, entre otros.

La detección temprana de estos fallos mecánicos mediante el uso de cámaras termográficas permite tomar medidas correctivas oportunas, como el mantenimiento preventivo, la reparación o el reemplazo de componentes, evitando así costosos tiempos de inactividad y averías catastróficas.

Además de los motores eléctricos, las cámaras termográficas se emplean para supervisar conexiones, transmisiones, cojinetes, bombas, compresores, correas, turbinas y cintas transportadoras. Estas herramientas brindan una visión completa de los sistemas mecánicos y facilitan la comparación de temperaturas entre diferentes equipos.

En el ámbito de la termografía aplicada a sistemas mecánicos, es posible detectar de manera temprana una serie de averías comunes. Algunas de estas averías incluyen problemas de lubricación, errores de alineación, motores sobrecalentados, rodillos sobrecalentados, bombas sobrecargadas, ejes de motor sobrecalentados y rodamientos con disipación de calor anómala. La utilización de una cámara termográfica permite identificar estas anomalías y tomar medidas correctivas de forma oportuna, evitando así la aparición de daños costosos y garantizando la continuidad de la producción. La termografía se convierte así en una herramienta indispensable para el mantenimiento predictivo y la optimización de los sistemas mecánicos.

### **4.2.3 INSTALACIONES DE CONDUCTOS, TUBERÍAS Y VÁLVULAS**

Las pérdidas de calor por un aislamiento defectuoso de un conducto son detectadas con mucha claridad en la termografía, posibilitando la rápida reparación o sustitución del aislamiento y con ello evitando importantes pérdidas energéticas u otros daños asociados.

Análogamente, las válvulas de proceso son otro buen ejemplo de equipamiento de tuberías cuya inspección se realiza habitualmente con cámaras termográficas ya sea para detectar fugas o para determinar si la válvula se encuentra en posición de apertura o cierre, incluso cuando estas se encuentran a cierta distancia.

En el ámbito de la termografía aplicada a sistemas mecánicos, es posible detectar de manera temprana una serie de averías comunes. Algunas de estas averías incluyen problemas de lubricación, errores de alineación, motores sobrecalentados, rodillos sobrecalentados, bombas sobrecargadas, ejes de motor sobrecalentados y rodamientos con disipación de calor anómala. La utilización de una cámara

termográfica permite identificar estas anomalías y tomar medidas correctivas de forma oportuna, evitando así la aparición de daños costosos y garantizando la continuidad de la producción. La termografía se convierte así en una herramienta indispensable para el mantenimiento predictivo y la optimización de los sistemas mecánicos.

#### **4.2.4 SISTEMAS TÉRMICOS, REFRACTARIOS Y PETROQUIMICOS**

Las tuberías refractarias de los hornos, calderas, estufas, incineradoras, equipos de craqueo y reactores tienden a degradarse y por tanto a perder rendimiento. Mediante una cámara termográfica, el material refractario dañado y la correspondiente pérdida de calor se pueden localizar con facilidad, puesto que la transmisión de calor se observará claramente en la termografía.

Las cámaras termográficas también se utilizan ampliamente en el sector petroquímico. Ofrecen un método de diagnóstico rápido y preciso para el mantenimiento de hornos, la gestión de la pérdida refractaria y la inspección de aletas de condensador. Los intercambiadores de calor se pueden inspeccionar para detectar conductos obstruidos.

Muchos de los tubos y conductos que conforman los equipos de craqueo tienen aislamiento de piedra refractaria resistente al calor cuya integridad se puede evaluar fácilmente con equipos termográficos.

Sin embargo, también es habitual que estos equipos presenten fallos en otros mecanismos:

- Penetración del coque en las tuberías y obstrucción del flujo del producto
- Acumulación de escoria en la superficie exterior de los tubos
- Recalentamiento o, en contraposición, el calentamiento inferior al deseado
- Impacto de la llama en las tuberías por una alineación incorrecta del quemador
- Fugas de producto que se inflaman y provocan daños graves en el equipo.

Para garantizar la calidad refractaria de instalaciones de calderas y hornos no es suficiente la realización de inspecciones desde el exterior. El material refractario del interior de calderas u hornos también ha de ser inspeccionado. A través de métodos convencionales, es necesario el cierre la instalación para poder inspeccionar su interior. Esto conlleva una pérdida de producción durante el tiempo que la instalación permanece cerrada, generándose importantes pérdidas económicas.

No obstante, existen algunas cámaras termográficas especiales que se pueden utilizar para inspeccionar el interior de las instalaciones mientras estas se encuentran en funcionamiento gracias a un filtro de llamas. Las llamas emiten radiación infrarroja a distintas intensidades con diferentes longitudes de onda y, en ciertas longitudes de onda del espectro de infrarrojos, las llamas casi no emiten radiación térmica. La información recopilada con la cámara termográfica también puede ser un mecanismo de control de gran importancia para aumentar de forma segura el nivel de producción, lo que puede mejorar en gran medida el rendimiento de la instalación.

Ciertos procesos de producción generan gases que arden en forma de llamas. Estas llamas a veces son invisibles al ojo humano. Es importante comprobar que la llama esté ardiendo, ya que, de otra forma, podrían liberarse gases nocivos a la atmósfera. Las termografías permiten ver con suma facilidad si la llama está ardiendo o no.

Las termografías también se utilizan para detectar niveles en depósitos. Gracias a los efectos de emisividad o a las diferencias de temperatura, son capaces de indicar de forma clara el nivel de líquido.

## **4.3 INDUSTRIA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES**

La termografía es una herramienta clave en las energías renovables, como la eólica y la fotovoltaica. Permite inspeccionar y analizar de manera precisa los sistemas, identificar problemas y garantizar el rendimiento y la seguridad. En la energía eólica, se utiliza para el mantenimiento de turbinas, detectando desgaste y averías. En la energía fotovoltaica, se emplea en la evaluación de paneles solares, identificando problemas que afectan la eficiencia. La termografía optimiza el rendimiento y facilita el mantenimiento en estas industrias.

### **4.3.1 TURBINAS EÓLICAS**

Las cámaras termográficas desempeñan un papel crucial en la supervisión y mantenimiento de turbinas eólicas, que son una importante fuente de energía renovable en todo el mundo. Estas turbinas están compuestas por diversos componentes mecánicos y eléctricos que requieren atención constante para garantizar su funcionamiento seguro y eficiente.

Una de las principales preocupaciones en el mantenimiento de turbinas eólicas es la detección temprana de posibles averías. Las cámaras termográficas pueden identificar anomalías térmicas en componentes como la caja de engranajes y el sistema de frenos. Estas fallas pueden ocasionar que las

palas de la turbina giren a velocidades superiores a las recomendadas, lo que genera cargas excesivas y pone en riesgo la integridad estructural de la turbina. La detección temprana de estas fallas permite realizar las reparaciones necesarias y evitar costosos tiempos de inactividad, así como accidentes peligrosos.

Además, las cámaras termográficas también son útiles para evaluar el rendimiento de las turbinas eólicas. Permiten identificar posibles puntos calientes en los componentes eléctricos, como los generadores y los sistemas de control, lo que puede indicar un desgaste o un mal funcionamiento. Al detectar estas anomalías a tiempo, se pueden tomar medidas preventivas para evitar averías graves y optimizar el rendimiento de la turbina.

- Accidentes:** El funcionamiento seguro de las turbinas eólicas es fundamental para evitar accidentes y garantizar la eficiencia de estas instalaciones. Los componentes mecánicos y eléctricos de las turbinas están sujetos al desgaste y pueden sufrir averías, lo que puede ocasionar situaciones peligrosas y costosos tiempos de inactividad. Una de las causas comunes de accidentes en las turbinas eólicas es la falla en el mecanismo de freno y la caja de engranajes. Estos componentes son responsables de controlar la velocidad de rotación de las palas de la turbina. Si alguno de ellos falla, las palas pueden girar a velocidades superiores a las recomendadas, lo que genera cargas excesivas y pone en riesgo la integridad estructural de la turbina. Para prevenir estos accidentes, es crucial realizar un mantenimiento regular y riguroso de las turbinas eólicas

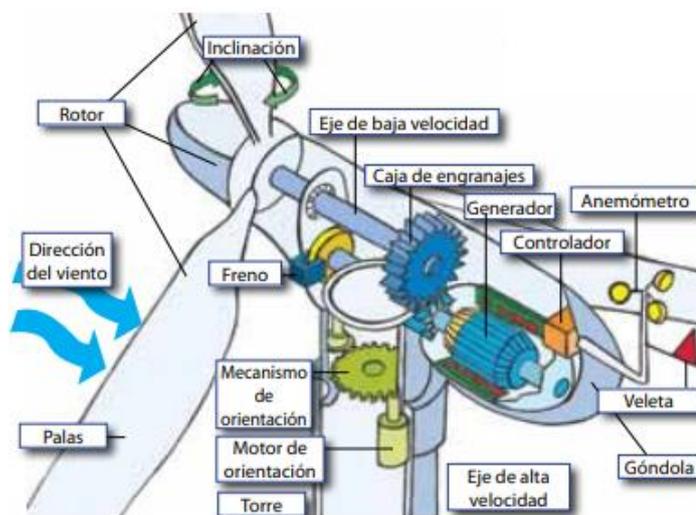


Figura 4.3.1: Esquema de los componentes de una turbina eólica. [16]

- **Peligro de muerte:** Es importante destacar el peligro potencial asociado a los accidentes en las turbinas eólicas, especialmente en relación con las palas del rotor. Debido a las altas velocidades de rotación, que pueden alcanzar cientos de kilómetros por hora, una pala o parte de ella que se desprenda repentinamente del rotor puede tener una gran cantidad de energía cinética y salir disparada a una velocidad considerable. Estas secciones de palas rotas representan un peligro significativo, ya que pueden desprenderse y viajar a distancias considerables desde la turbina de la que se desprendieron. Se han registrado casos en los que se encontraron secciones de palas a cientos de kilómetros, e incluso más lejos, del lugar de origen. Estos accidentes con palas rotas representan un riesgo de peligro de muerte tanto para los trabajadores que se encuentran cerca de las turbinas como para cualquier persona que se encuentre en las cercanías del área donde se produce el desprendimiento. Para garantizar la seguridad, es esencial llevar a cabo inspecciones regulares y exhaustivas de las palas del rotor y otros componentes de las turbinas eólicas. Las cámaras termográficas pueden ser utilizadas como herramientas de detección para identificar posibles defectos, daños o desgastes en las palas, lo que ayuda a prevenir situaciones peligrosas y tomar medidas correctivas antes de que ocurran accidentes. Además, es fundamental seguir las normas y procedimientos de seguridad establecidos por los fabricantes y operadores de las turbinas eólicas, así como recibir una capacitación adecuada para trabajar en entornos donde se encuentran estas instalaciones. Esto incluye el uso de equipos de protección personal y la implementación de medidas de seguridad adecuadas durante el mantenimiento y las operaciones relacionadas con las turbinas eólicas.
- **Ubicación del problema:** La termografía ofrece la capacidad única de "ver" el problema de manera precisa. Mientras que otras tecnologías pueden indicar si hay un problema general en la maquinaria, las cámaras termográficas permiten identificar el componente específico que está generando el problema. Esto facilita la reparación o reemplazo de cojinetes, ejes, engranajes, frenos u otros componentes desgastados antes de que se produzca una avería.
- **Comprobación del sistema completo:** Las cámaras termográficas son útiles para realizar una comprobación exhaustiva de todo el sistema. No solo se pueden inspeccionar los componentes mecánicos de las turbinas eólicas, sino también los elementos eléctricos como transformadores, conectores, controladores y motores de orientación. Esto proporciona una visión integral de la condición de la turbina eólica y del sistema eléctrico asociado.

### 4.3.2 PANELES SOLARES

El uso de cámaras termográficas en la evaluación de paneles solares presenta múltiples ventajas. La termografía proporciona una visualización clara de las anomalías, y a diferencia de otros métodos, se puede realizar durante el funcionamiento normal de los paneles. Además, las cámaras termográficas permiten escanear grandes áreas en poco tiempo, agilizando el proceso de inspección y detección de posibles problemas.

El uso de cámaras termográficas permite detectar y reparar áreas problemáticas en las celdas solares antes de que ocurran problemas o averías. Sin embargo, es importante tener en cuenta que no todas las cámaras termográficas son adecuadas para la inspección de celdas solares. Se deben seguir reglas y directrices específicas para realizar inspecciones efectivas y asegurarse de obtener conclusiones precisas. Esto garantiza que se tomen las medidas necesarias para mantener el rendimiento y la eficiencia de los paneles solares.

## 4.4 FABRICACIÓN ADITIVA

En la fabricación aditiva, la temperatura es uno de los factores de los que depende la calidad del producto final. Las cámaras termográficas registran la evolución y las desviaciones de la temperatura en tiempo real y permiten una intervención rápida en el proceso en curso.

### 4.4.1 CONTROL DE PROCESOS MONITOREADOS Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, se refiere a los procesos de fabricación en los que el material se aplica capa por capa para crear objetos tridimensionales. De este modo se producen procesos químicos y físicos de endurecimiento y fusión, en los que la temperatura juega un papel decisivo. Las cámaras infrarrojas respaldan el seguimiento sistemático de todo el proceso de fabricación y mecanizado.

Numerosos de estos procesos de fabricación se basan en tecnologías láser, como la fusión por láser, la sinterización o la soldadura por acumulación. Otros procesos, como el chorro de aglutinante, se completan con un pase de sinterización para curar completamente el material. La detección de la distribución de temperatura de la superficie del lecho de polvo y la medición de las temperaturas de

fusión son relevantes en la mayoría de los casos. Ambos pueden realizarse para rangos de temperatura superiores a 2.000 °C y mientras el láser está funcionando (medición insitu). La temperatura también juega un papel decisivo para lograr la mejor dureza superficial posible y propiedades antiadherentes óptimas. Las cámaras infrarrojas se pueden integrar directamente en el sistema de control de procesos para permitir una medición de temperatura no invasiva y sin contacto.

La supervisión estrecha de máquinas, plantas de procesamiento, materiales y temperaturas durante la producción y el procesamiento de piezas aditivas es de fundamental importancia tanto en la industria como en la investigación. El mapeo de los flujos de calor en los componentes es necesario para una comprensión completa del proceso y permite un control preciso del desarrollo de la temperatura en las piezas y materiales a procesar, así como un control térmico exacto del proceso. Por lo tanto, es posible una detección temprana de errores en la producción, se evitan activamente los rechazos y se minimizan las devoluciones.

Además, los tiempos del proceso y del ciclo se pueden optimizar significativamente y se pueden derivar correlaciones entre los parámetros del proceso y las temperaturas (de fusión).

#### **4.4.2 RESQUISITOS DE LAS CÁMARAS INFRARROJAS PARA LA FABRICACION ADITIVA POR LÁSER**

Debido a las características de los láseres en la fabricación aditiva, las cámaras infrarrojas utilizadas deben cumplir requisitos específicos. Esto se aplica, por ejemplo, con respecto a la resolución temporal. Trabajar con un láser generalmente se caracteriza por tiempos de acción del láser cortos, donde la entrada de calor se produce en fracciones de segundo. Esto requiere mediciones con altas frecuencias de imagen en imágenes completas y parciales. Particularmente en el procesamiento de micromateriales con luz láser por pulsos, las exigencias de los sistemas de termografía son muy altas.

La resolución térmica y geométrica de las cámaras infrarrojas es igualmente importante. Según el proceso y el material, los láseres se pueden utilizar para crear diferencias de temperatura muy grandes o pequeñas, que deben controlarse de forma continua y muy precisa.

### **4.5 INDUSTRIA AUTOMOVILÍSTICA**

La técnica más extendida para comprobar la seguridad de los automóviles son las *pruebas de choque*, un verdadero quiebro de cabeza para ingenieros y controladores, pues en el transcurso de este proceso

el dispositivo a probar queda inutilizado, sin que se puedan realizar más pruebas ni remediar las deficiencias del producto.

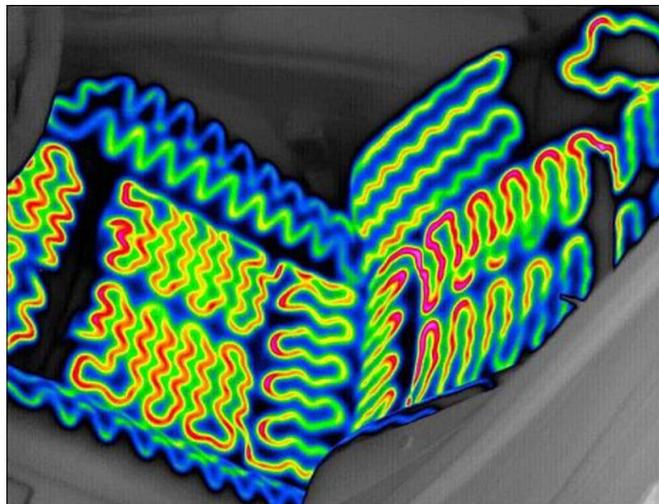


Figura 4.5.1: Imagen infrarroja de un asiento calefactado. [19]

La termografía plasma visualmente los defectos de catalizadores, sistemas eléctricos y motores sometidos a prueba sin dañarlos. Es importante hacer notar que hay defectos y deficiencias de múltiples productos de la industria automotriz que solo se pueden detectar mediante cambios de temperatura (asientos calefactados, asilamiento de ventanas...)

En la industria química, la termografía se utiliza para diversos cometidos:

1. **Control de calidad en la fabricación:** La termografía se utiliza para la detección de defectos en piezas de automóviles, como soldaduras y ensamblajes, mediante la medición de la temperatura. La detección temprana de defectos permite corregirlos antes de que se produzca un daño mayor.
2. **Diagnóstico de problemas mecánicos:** La termografía puede detectar problemas mecánicos en el motor, frenos y otros sistemas, mediante la medición de la temperatura en las diferentes partes del vehículo. Esto puede permitir la identificación temprana de problemas y la realización de reparaciones preventivas.
3. **Evaluación de la eficiencia energética:** La termografía se utiliza para evaluar la eficiencia energética de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) en los edificios de la industria automotriz. La identificación de áreas con fugas de calor permite la realización de mejoras en la eficiencia energética y la reducción de los costos operativos.

4. **Seguridad en la conducción:** La termografía se puede utilizar para detectar objetos en la carretera y animales en la noche o en condiciones de poca luz, mediante la medición de la temperatura de los objetos. Esto puede mejorar la seguridad en la conducción al permitir a los conductores anticipar y reaccionar a los obstáculos en la carretera.

## 4.6 INDUSTRIA LÁSER

Las aplicaciones de los láseres son de gran importancia en la industria, la ciencia y la medicina modernas porque las propiedades de la radiación láser permiten una amplia variedad de aplicaciones. Se utilizan, entre otras cosas, en metrología para mediciones muy precisas de distancias, espesores de materiales o perfiles de superficies. Además, funcionan bien en espectroscopia, por ejemplo, en el análisis de compuestos químicos. La tecnología médica utiliza la radiación láser en áreas como la oftalmología y la extirpación de tumores. También encontramos tecnología láser en muchos dispositivos cotidianos: al escanear códigos de barras en la caja, en impresoras láser en la oficina o al medir la velocidad del tráfico.

Los láseres se han utilizado en la industria durante muchos años, especialmente en la manipulación de materiales. Realizan procesos como cortado y soldado de metal, plástico o vidrio, así como diversos materiales compuestos, aplicación recubrimientos protectores y tratamientos térmicos de endurecimiento, secado y suavizado. Las ventajas son obvias: los láseres en sí mismos no se desgastan, no necesitan ser reemplazados y pueden configurarse de manera flexible para procesar con precisión y cuidado diferentes materiales.

Entre los muchos láseres industriales, están aquellos que usan energía térmica para procesar materiales. Aquí es donde el monitoreo y control continuo del proceso de generación de calor es importante para tratar los materiales de acuerdo a sus propiedades y así cumplir con los estándares de calidad y seguridad.

Las cámaras termográficas permiten la visualización y el análisis de flujos de calor sin contacto en los objetos o componentes de prueba y medición relacionados. La medición de la temperatura en su superficie le permite controlar el consumo de energía del láser, asegurando así un calentamiento óptimo de la pieza de trabajo.

#### 4.6.1.1 SINTERIZACIÓN POR LÁSER

En la sinterización por láser, también conocida como sinterización selectiva por láser (SLS), el lecho se calienta mediante el suministro de energía térmica hasta alcanzar temperaturas superiores al punto de fusión, momento en el que unen entre sí. Este proceso se utiliza para plásticos y cerámicas y también metales. La aplicación para metales se denomina sinterización directa de metales por láser (DMLS). La sinterización por láser, SLS y DMLS, se encuentran entre los procesos industriales de impresión 3D en la fabricación aditiva.

La temperatura es uno de los factores de los que depende en gran medida la calidad del proceso y por ende, la calidad del producto final, con independencia del material de que se trate. La superficie denominada lecho de polvo se debe precalentar a una temperatura por debajo del punto de fusión (unos 170 °C en la sinterización láser de plásticos). La energía del láser funde las partículas de polvo en una ventana de temperatura específica a fin de unirlos. Siguiendo un modelo tridimensional digital almacenado en el control láser, el procedimiento se repite capa por capa hasta que completar el componente.

Las cámaras infrarrojas se pueden integrar directamente en una máquina de sinterización láser para tomar diferentes medidas, siendo las más importantes la detección de la distribución de temperatura de la superficie del lecho de polvo y la medición de la temperatura de fusión. Ambos se pueden realizar mientras el láser está operativo (medición in situ). El uso de ventanas de protección láser bloquea la radiación en el rango de longitud de onda del láser y, por lo tanto, evita que el láser dañe la cámara infrarroja. Al mismo tiempo, estas ventanas tienen una transmisión muy alta en el rango de longitud de onda de la cámara.

Otra aplicación de la termografía infrarroja en la sinterización por láser es el análisis térmico del enfriamiento de la zona sinterizada. Las áreas de la superficie que no se hayan calentado suficientemente o de manera homogénea mostrarán tras el proceso propiedades no deseadas o desvíos en las tolerancias. Por último, se pueden monitorear la función y la homogeneidad de los calentadores radiantes acoplados en máquinas láser.

#### 4.6.1.2 CORTE POR LÁSER

El corte láser se basa en la introducción de energía térmica a una pieza de trabajo. Constituye un método de máxima precisión, aunque se encuentra limitado a pequeños espesores de chapa. Los materiales procesados carecen de rebabas, lo que permite omitir los laboriosos trabajos postproceso.

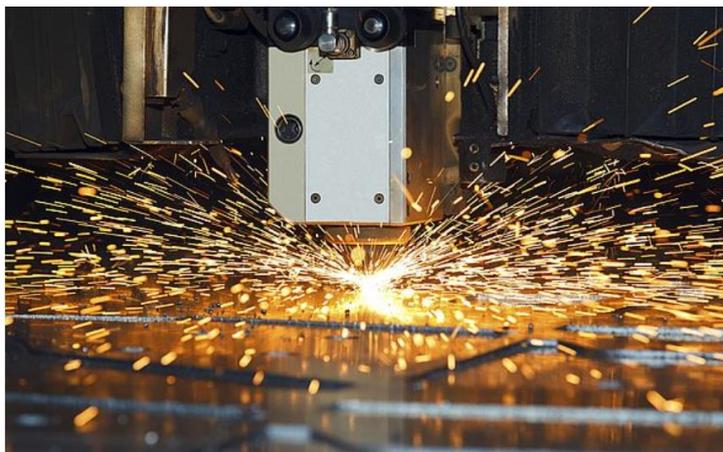


Figura 4.6.1: Corte láser. [19]

En el corte por láser se distinguen tres procesos diferentes:

- Fusión de la zona de corte.
- Calentamiento, fusión y posterior combustión espontánea del material.
- Evaporación del material por sublimación.

En todos los tipos de corte por láser, la entrada de calor exacta y la distribución del calor en la superficie del componente constituyen factores importantes. A una temperatura crítica, la pieza de trabajo se ve seriamente afectada térmicamente y experimenta un cambio en su microestructura cerca del borde del corte.

#### 4.6.1.3 SOLDADURA POR LÁSER

Un control de proceso basado en termografía con el apoyo de una cámara infrarroja es especialmente beneficioso cuando se trata de materiales como compuestos reforzados con fibra de carbono (CFRP) dado que la temperatura de fusión de las fibras de carbono es mucho más elevada que la de las matrices plásticas contenidas en CFRP. Para que el calentamiento y la fusión tengan éxito en la producción de un material compuesto sólido, la temperatura de fusión y del componente debe medirse de forma

precisa con una cámara infrarroja de alta resolución. En base la verificación (de forma no destructiva) de la homogeneidad lograda del componente en el cordón se pueden realizar afirmaciones fiables sobre la calidad realizada del cordón de soldadura.

El láser derrite el material de aporte de la soldadura, llenando el espacio de unión con material adicional y uniendo los componentes. Con el láser, se pueden realizar combinaciones de temperatura-tiempo muy específicas en los puntos de soldadura y, con la ayuda de una cámara infrarroja, también llevar un seguimiento de parámetros reales del proceso para verificar que corresponda a los parámetros de proceso especificados con la ayuda de una cámara infrarroja.

La combinación de la soldadura por láser con análisis termográficos es relevante, por ejemplo, para las industrias de semiconductores, electrónica y optoelectrónica. Es habitual que se procesen componentes electrónicos muy pequeños (pocas décimas de milímetro) considerablemente sensibles al calor. Los métodos de soldadura selectiva deben controlar con precisión la entrada de calor y evitar cualquier daño a los componentes circundantes.

En la soldadura láser capilar gap, es extremadamente importante la cámara IR tenga una elevada frecuencia de muestreo para una medición fiable de la temperatura y un análisis visual del proceso. En este proceso, el material de aporte líquido se introduce en el espacio entre los dos objetos por el efecto de capilaridad. A temperaturas de proceso muy por encima de los 1000 °C, el láser debe templar la zona de unión de la forma más homogénea posible. El seguimiento termográfico del proceso proporciona información sobre los cambios de temperatura en el proceso de llenado de huecos y la influencia la estrategia de templado. Los usuarios pueden realizar distintas acciones correctoras en relación a los datos obtenidos:

- Ajustar la estrategia de control de temperatura
- Reducir los tiempos de soldadura
- Optimizar la planificación ferroviaria
- Comprobar la penetración óptima del calor
- Reducir el estrés térmico en las zonas circundantes.

Para garantizar que el proceso de generación de imágenes funcione y los resultados sean confiables, las lentes de la cámara deben protegerse de la radiación láser reflejada a elevadas temperaturas de procesamiento (de 500 °C a 2000 °C) mediante un filtro para la medición a través del vidrio.

Adicionalmente, la cámara termográfica debe protegese frente a salpicaduras procedentes del proceso de soldadura.

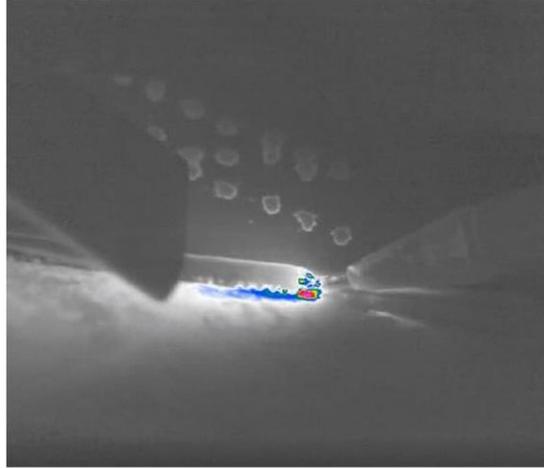


Figura 4.6.2: Soldadura láser. [19]

#### 4.6.2 VENTAJAS Y RESULTADOS DEL CONTROL DE PROCESOS CON TERMOGRAFÍA

Ventajas:

- Medición de temperatura sin contacto y no reactiva
- Mapeo de flujos de calor en componentes para obtener una comprensión completa del proceso
- Control de preciso de la entrada de energía y reducción de la carga térmica
- Cálculo exacto de la entrada del aporte de energía final por láser en el componente debido al registro geométrico y temporal completo de las distribuciones de temperatura en procesos altamente dinámicos
- Posicionamiento óptimo de láseres no visibles (láser UV, láser IR)
- Supervisión fiable de procesos de calentamiento y enfriamiento de materiales

Resultados:

- Detección temprana de errores en la producción, prevención activa de rechazos y minimización de devoluciones

- Optimización de los tiempos de proceso y ciclo, así como del procesamiento previo y posterior
- Ensayos no destructivos de uniones soldadas por láser
- Control láser directo basado en la temperatura del objeto observado en tiempo real
- Derivación de correlaciones entre parámetros de proceso y temperaturas (de fusión)

## 4.7 ÁMBITO MILITAR

En el ámbito militar, la termografía se utiliza las siguientes aplicaciones, entre otras:

- Detección de objetivos enemigos ocultos
- Identificación de puntos calientes en sistemas de armamento
- Monitoreo de la temperatura de motores y sistemas electrónicos
- Detección de dispositivos explosivos improvisados
- Evaluación de daños en estructuras después de un ataque.

Estas capacidades permiten a las fuerzas militares disponer de mayor cantidad de información de cara a tomar decisiones estratégicas, mejorar la eficiencia operativa y garantizar la seguridad de su personal.

Además, la termografía es especialmente útil en condiciones adversas, como la oscuridad, el humo, la niebla o el camuflaje, donde otros métodos de detección pueden ser menos efectivos. La capacidad de visualizar el calor radiante proporciona a los militares una ventaja crítica al permitirles identificar objetivos ocultos, lo que puede marcar la diferencia en situaciones de combate y operaciones tácticas.

La termografía se ha convertido en una herramienta indispensable en el ámbito militar, respaldando las operaciones y contribuyendo a la seguridad y eficacia de las fuerzas armadas.

### 4.7.1.1 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS PARA LA DETECCIÓN DE INFLTRACIONES DE AGUA EN ESTRUCTURAS AERONAUTICAS

En la actualidad, la identificación precisa de puntos con retención de humedad en materiales compuestos estructurales se logra mediante el uso de las técnicas de termografía y rayos X. La técnica de rayos X, que ha sido utilizada durante mucho tiempo en operaciones de mantenimiento aeronáutico.

En contraste, la técnica de termografía es relativamente nueva en el campo aeronáutico. En la siguiente tabla se presentan resumidas las ventajas y desventajas de estas técnicas mencionadas previamente:

Tabla 4.7.1: Comparativa entre la técnica de rayos X y la técnica termográfica. [20]

<b>Rayos X</b>	<b>Termografía</b>
<b>Identificación de las zonas con infiltraciones de agua sin contornos definidos</b>	<b>Identificación de las zonas con infiltraciones de agua con contornos claramente definidos</b>
<b>Necesidad de contacto</b>	<b>Sin contacto</b>
<b>Costes asociados a:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adquisición del equipo</li> <li>• Mantenimiento del equipo</li> <li>• Película</li> <li>• Revelador</li> <li>• Cámara de revelación</li> </ul>	<b>Costes asociados a:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adquisición del equipo</li> <li>• Mantenimiento del equipo</li> </ul>
<b>Resultados no inmediatos y necesidad de interrupción de procesos</b>	<b>Resultados en tiempo real y sin interrupción de procesos</b>
<b>Operarios expuestos a radiación</b>	<b>Operarios en condiciones de trabajo de bajo riesgo</b>

El panel de abeja es una estructura ampliamente utilizada en diversas partes de los aviones modernos debido a su gran ligereza y resistencia. No obstante, es crucial proteger esta estructura mediante una capa exterior de fibra de carbono. Durante los vuelos a gran altitud, la disminución de la presión provoca la salida del aire atrapado en las celdas del panel de abeja, al mismo tiempo que el agua presente en dichas celdas se congela y expande, comprometiendo la integridad estructural. Como resultado, se forman grietas en las celdas cercanas, lo que agrava el problema. La presencia de hielo en las celdas provoca vibraciones y afecta el equilibrio y el consumo de combustible del avión debido

al aumento de peso. La combinación de técnicas como la aplicación de calor, vacío, ultrasonido, fuerzas centrífugas y pulsos eléctricos ha demostrado una eficiencia del 80% en la eliminación del agua atrapada en las celdas de los paneles. El uso de cámaras termográficas permite supervisar el proceso de eliminación y detectar puntos en los que se infiltra el agua. El momento ideal para llevar a cabo una inspección termográfica es justo tras el aterrizaje de la aeronave

Hasta ahora, el uso de cámaras termográficas para inspecciones se ha limitado a la industria aeroespacial y a la investigación en el ámbito de la aviación militar debido a sus grandes costes. En la aviación civil, apenas existen parámetros y protocolos de mantenimiento para su aplicación. No obstante, la termografía ha demostrado ser una técnica no destructiva eficaz en el mantenimiento preventivo y correctivo de paneles eléctricos en las cabinas de vuelo. Eso sí, se requiere de una metodología rigurosa para evitar interpretaciones erróneas de las condiciones reales del objeto examinado.

#### 4.7.1.2 SEGURIDAD NACIONAL

La tecnología de termografía es considerada sensible para asuntos de seguridad nacional y algunos gobiernos, como los Estados Unidos de América, regulan su exportación a través del Departamento de Comercio. Bajo la iniciativa la iniciativa ECR (Export Control Reform), se clasifican como tecnología sensible para visión nocturna estos dispositivos:

- a) Arrays de Plano Focal (FPAs).
- b) Tubos de Intensificación de Imagen (IITs).
- c) Sensores de Baja Luz (LLL)
- d) Cámaras de visión directa tanto enfriadas como no enfriadas para el infrarrojo y el infrarrojo cercano (IMAGERS)

En la detección de radiación infrarroja, como ya se citó en apartados previos, se emplean dos métodos:

- **Las cámaras enfriadas:** requieren enfriadores criogénicos para reducir el ruido y aumentar la sensibilidad del dispositivo. Además, emplean técnicas para disminuir la radiación ambiental y mejorar la calidad de la imagen. Por otro lado, los detectores sin

- **Las cámaras no enfriadas:** operan cerca de la temperatura ambiente y utilizan sensores como micro bolómetro. Son más pequeñas y económicas que las enfriadas, pero tienen menos sensibilidad.

Tanto los componentes como las cámaras diseñadas exclusivamente para uso militar comparten características comunes:

- Ambos presentan un rendimiento superior y especificaciones más rigurosas que las utilizadas en aplicaciones duales.
- Están construidos según estándares y especificaciones MIL.
- Evolvente resistente que puede soportar condiciones ambientales adversas y estrés térmico.
- Precio elevado, modos de lectura distinto y un software más estable.
- Capacidad de montaje en armamento.



Figura 4.7.1: Misil guiado por láser “Nimrod SR” fabricado por Israel Aerospace Industries. [20]

Un ejemplo de aplicación militar exclusiva de cámaras infrarrojas se puede observar en los misiles guiados por imagen térmica (Figura 4.7.1). Estas armas autónomas ajustan su dirección en función del calor (radiación) emitido por el objetivo, aunque pueden ser engañados por destellos y fuentes intensas de calor.

### 4.7.1.3 DETECCIÓN DE MOVIMIENTO EN SISTEMAS DE DEFENSA

El cometido principal de los “Sistemas Automáticos de Reconocimiento de Objetivos” (ATR) es la detección, rastreo e identificación de objetivos a partir de una señal de video, mientras que el “Monitoreo de Perímetro” se centra en identificar cualquier movimiento inesperado o no deseado de personas o vehículos en un área vigilada. Las imágenes térmicas desempeñan un papel fundamental en estos sistemas dado que su operatividad no se entorpecida bajo condiciones climáticas adversas.

Un sistema de identificación de objetivos en movimiento se compone de:

- Cámara térmica
- Unidad de almacenamiento
- Sistema de procesamiento de video
- Sistema de comunicaciones
- Software de compresión con algoritmos diseñados para la detección de movimiento

### 4.7.1.4 DETECCIÓN DE PEATONES

Con la tendencia hacia el desarrollo de vehículos autónomos (sin conductor), es necesario contar con sistemas de visión que garanticen la seguridad de los pasajeros y los peatones. En este contexto, el análisis de imágenes térmicas se convierte en una herramienta que puede ayudar a la identificación de personas, animales y objetos se interpongan repentinamente en la trayectoria del vehículo. Por ejemplo, desde 2005, algunos automóviles Mercedes Benz cuentan con el sistema “Night View Assist”, que permite detectar peatones en condiciones de poca iluminación de forma similar a los sistemas de visión nocturna. El principal inconveniente de este método es que requiere que los humanos estén a una temperatura mayor que la temperatura de fondo, las imágenes térmicas ofrecen la ventaja de la visión nocturna en video. Además, existen otros métodos que analizan y comparan el contorno humano desde diferentes ángulos, lo que aumenta la confiabilidad de la detección por infrarrojo.

El algoritmo que se emplea de forma más extendida consta de tres partes:

1. **Generación de candidatos:** se procesa la imagen térmica para localizar simetrías con un tamaño y aspecto específicos.

2. **Filtrado de candidatos:** se eliminan falsos positivos como postes, letreros y construcciones con simetrías similares, analizando el histograma vertical en cada cuadro.
3. **Validación de candidatos:** se extraen características morfológicas humanas de un modelo y se compara cada cuadro filtrado con el modelo para su validación [20].



Figura 4.7.2: Imagen infrarroja de unos peatones cruzando la calle captada por un vehículo autónomo [21]

## 4.8 TERMOGRAFÍA AÉREA

Mediante el uso de un helicóptero equipado con un cardán estabilizador de imagen, la cámara de infrarrojos añade otra dimensión al mundo de la termografía aérea y los datos de imagen capturados. Una cámara infrarroja en una posición elevada proporciona una excelente visión general termográfica para muchos campos de aplicación. Dependiendo de la tarea, los aviones y los drones también son adecuados como vehículos de transporte y ofrecen numerosas opciones.

### 4.8.1 EXTINCIÓN DE INCENDIOS DESDE EL AIRE

Se puede utilizar sistemas termográficos de alta resolución, calibrados radiométricamente, para hacer un seguimiento de una correcta descarga adecuada de los contenedores de agua para la extinción de incendios forestales e incluso para detectar personas desaparecidas desde el aire. Incluso en presencia de humo y llamas, la distribución del agua de extinción se puede apreciar gracias a la alta resolución térmica de la cámara infrarroja. Como consecuencia, los de respuesta evaluar rápidamente la eficiencia de la descarga del tanque de agua.



Figura 4.8.1: Helicóptero realizando labores de extinción de incendios. [19]

- Investigación agrícola y agricultura de precisión.
- Investigación geográfica con cámaras infrarrojas aerotransportadas
- Mapeo térmico con plataformas de cámaras aerotransportadas
- Inspección aérea y mantenimiento de líneas eléctricas de larga distancia
- Conteo y registro de vida silvestre
- Sistemas cardán para montaje en helicóptero

## 4.8.2 INVESTIGACIÓN AGRÍCOLA Y AGRICULTURA DE PRECISIÓN

El cambio climático está creando nuevos desafíos para la agricultura moderna. La falta de lluvia seca los suelos y afecta la distribución de las aguas subterráneas. Para una evaluación integral del suelo, un sistema de termografía aerotransportado (principalmente drones) puede proporcionar datos importantes evaluación completa del suelo, como, por ejemplo, el contenido de humedad del subsuelo mediante el registro de la temperatura de este. De esta forma se pueden regar únicamente los lugares necesarios sin desperdiciar agua.

## 4.8.3 MAPEO DE INCENDIOS

Combatir los incendios en el suelo se vuelve extremadamente complicado en terreno de difícil acceso y aparte representa un gran peligro para la vida que representa el fuego. El mapeo aéreo de incendios

se posiciona como una gran alternativa, proporcionando una visión global y una evaluación fiable de la situación. De hecho, actualmente es la mejor herramienta posible en tiempo real para detectar y combatir incendios forestales en tiempo real. La flexibilidad y maniobrabilidad de los helicópteros les permiten ser utilizados incluso en situaciones críticas de vuelo, y por ello suelen ser las plataformas empleadas para portar cámara infrarroja calibrada radiométricamente.



Figura 4.8.2: Helicóptero con sistema GIMBAL montado en la parte delantera. [19]

Se puede crear un mapa de temperatura del suelo en tiempo real y generar una visión general completa de los incendios forestales. También se pueden distinguir entre bosques en llamas, estructuras de edificios y mamíferos o personas que intentan escapar. Con la información obtenida, la lucha contra incendios sobre en tierra puede coordinarse mejor y ser más específica, incluso en condiciones de humo, niebla o poca visibilidad.



Figura 4.8.3: Imagen infrarroja de un incendio. [19]

#### 4.8.4 INVESTIGACIÓN GEOGRÁFICA

La mineralogía, la minería, la investigación básica y el desarrollo de sensores espaciales son aplicaciones de la geociencia que pueden llevar a cabo los sistemas de termografía aérea.



Figura 4.8.4: Imagen térmica aérea. [19]

#### 4.8.5 MAPEO TÉRMICO

El mapeo térmico aéreo es una herramienta fundamental para estimar el presupuesto destinado al abastecimiento energético de los municipios. Además, con los sistemas mapeo térmico, se puede crear una visión general instantánea del estado de las redes de calefacción distribuidas, las cuales precisan de un mantenimiento remoto prolongado y eficiente. De esta forma, los equipos en tierra pueden reaccionar de inmediato a los defectos y fugas utilizando un mapa térmico creado por la plataforma aérea.

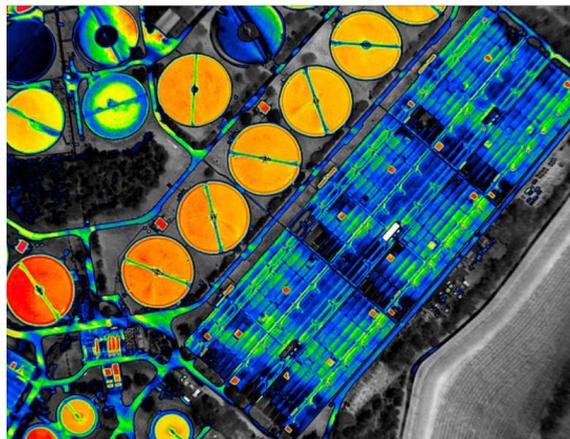


Figura 4.8.5: Imagen infrarroja de un mapeo térmico aéreo. [19]

#### 4.8.6 INSPECCIÓN AÉREA Y MANTENIMIENTO DE LÍNEAS ELÉCTRICAS

Las líneas eléctricas de larga distancia forman la columna vertebral de la infraestructura de cualquier país. A fin de satisfacer las necesidades de los habitantes y la industria local, la disponibilidad ininterrumpida de energía eléctrica es imprescindible. Un método de inspección probado durante años para garantizar el abastecimiento es el uso cámaras infrarrojas montadas en helicópteros.

La función del sistema de termografía detecta principalmente "puntos calientes" a lo largo de la línea eléctrica y en los aisladores, los cuales son indicios comprobado de defectos materiales que pueden provocar daños o fallas en el sistema. La termografía también es un método confiable para la detección remota de puntos calientes en cables eléctricos subterráneos, que también funciona perfectamente desde plataformas aéreas desde una posición elevada. En contraste, las inspecciones visuales cerca del suelo no ofrecen la velocidad y eficiencia de una inspección termográfica aérea y las inspecciones remotas con cámaras de video o binoculares presentan una probabilidad de detección es mucho menor y ralentizan el movimiento desde el aire

#### 4.9 SEGURIDAD Y VIGILANCIA

Actualmente la mayor parte de las instalaciones implementan tecnologías relacionadas con la termografía en las cámaras de seguridad. Si bien no muchos años atrás la aplicación de este tipo de tecnología en el ámbito de la seguridad quedaba relegada únicamente a organismos gubernamentales, puestos fronterizos... la rápida economización de los equipos termográficos en los últimos tiempos ha

hecho que sea mucho más fácil adquirirlos, lo cual ha conllevado una mayor extensión en el uso de estos ya sea para fines de protección o identificación.

Entre los principales usuarios de estos equipos se encuentran:

- Centros comerciales
- Grandes almacenes
- Instalaciones petrolíferas
- Aeropuertos
- Puertos
- Cuerpos de seguridad

Un sistema de seguridad basado en imágenes térmicas es fundamental tanto para la protección de bienes como para la reducción de riesgos humanos mediante, en primer lugar, el efecto disuasorio de los equipos y, en segundo lugar, la rápida detección de actos de terrorismo, vandalismo o violencia que puedan poner en peligro la seguridad del personal.

Los escáneres que hay en los aeropuertos para el control de pasajeros y de maletas son de rayos X. Sin embargo, durante la epidemia de coronavirus países como China comenzaron la implementación de controles con cámaras térmicas para medir la temperatura corporal de los pasajeros y de esta forma poder determinar con una precisión que pasajeros tenían fiebre, siendo potenciales portadores del virus, puesto que la fiebre es uno de los síntomas más comunes indicadores de la respuesta del cuerpo frente a una infección. Si bien China fue pionera en tomar estas medidas en sus aeropuertos, medidas similares fueron adoptadas por una gran cantidad de países de todo el mundo, transformándose las medidas de control térmico de pasajeros en prácticamente en un estándar internacional en los aeropuertos.

Las cámaras de imágenes térmicas generalmente están integradas con sensores inteligentes y tecnología analítica avanzada, lo que ayuda a reducir una gran cantidad de falsas alarmas. Además, los sistemas basados en la detección de calor más económicos en los referentes a la instalación que la gran mayoría de sistemas de videovigilancia.

La policía y los organismos encargados de velar por la seguridad y el cumplimiento de la ley implementan cámaras termográficas en sus equipos de vigilancia, utilizados para:

- Localización de sospechosos (especialmente en horario nocturno)
- Investigación de escenas del crimen
- Operaciones de rescate y redadas

Estos equipos proporcionan prestaciones muy superiores a los dispositivos de visión nocturna ya que no se ven afectados por las luces brillantes o destellos.

#### 4.10 INDUSTRIA QUÍMICA

Las reacciones químicas pueden generar flujos de calor que se clasifican como endógenos o exógenos. La termografía es una técnica que permite generar imágenes de la distribución de la temperatura durante estos procesos, lo que no solo permite medir los flujos de calor en puntos específicos, sino también analizar el proceso completo. Además, la medición sin contacto tiene ventajas adicionales, ya que es posible medir los productos químicos que reaccionan y se pueden evitar conexiones con múltiples sensores de temperatura de contacto.

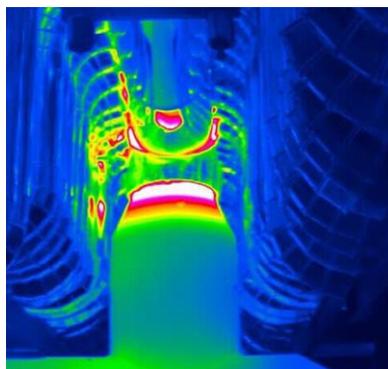


Figura 4.10.1: Imagen infrarroja de un reactor. [19]

En la industria química, la termografía se utiliza en diversas aplicaciones, algunas de las cuales se describen a continuación:

1. **Monitorización de procesos químicos:** La termografía se utiliza para monitorizar la temperatura de los procesos químicos, permitiendo detectar cambios de temperatura que puedan indicar una reacción química o un problema en el proceso.
2. **Detección de fugas:** La termografía se utiliza para detectar fugas en tuberías y tanques utilizados para el almacenamiento y transporte de productos químicos. La detección temprana

de fugas puede evitar accidentes y minimizar los riesgos de seguridad. También se utiliza la termografía para monitorear el nivel de líquido en tanques donde se almacenan productos químicos líquidos o en espuma, mediante la detección de la diferencia de temperatura entre el área que contiene el líquido o la espuma y la zona sin líquido situada por encima.

3. **Evaluación de la eficacia del aislamiento térmico:** La termografía se utiliza para evaluar la eficacia del aislamiento térmico en los equipos de proceso, como los intercambiadores de calor. La detección de pérdidas de calor o de zonas frías puede ayudar a optimizar el rendimiento del equipo y reducir el consumo de energía. Por ejemplo, los reactores están fuertemente aislados en la industria química para cumplir con las temperaturas de reacción requeridas y proteger el medio ambiente de temperaturas demasiado altas. Los sistemas de cámaras infrarrojas son útiles para verificar el aislamiento de los reactores y sus tuberías de alimentación y descarga.
4. **Inspección de equipos:** La termografía se utiliza para inspeccionar equipos, como reactores, mezcladores y calderas, para detectar puntos calientes y otros problemas de sobrecalentamiento.
5. **Evaluación de la calidad de los productos:** La termografía se utiliza para evaluar la calidad de los productos químicos, detectando posibles defectos en las superficies de los recipientes o en los productos mismos.

#### 4.11 INDUSTRIA DEL VIDRIO

La termografía es una técnica de medición sin contacto que también tiene aplicaciones en la industria del vidrio. En este campo, se puede utilizar para la medición de la temperatura durante la producción y el procesamiento del vidrio. La medición de la temperatura es importante para asegurar la calidad del vidrio, ya que la temperatura incorrecta puede resultar en deformaciones o roturas.

Por ejemplo, durante el proceso de fabricación del vidrio, se puede utilizar la termografía para medir la temperatura del vidrio fundido en los hornos. Esto permite a los operadores ajustar la temperatura en consecuencia y asegurar que el vidrio se enfríe adecuadamente para evitar deformaciones. También se puede utilizar la termografía para medir la temperatura en los moldes utilizados para dar forma al vidrio. De esta manera, los operadores pueden asegurarse de que el vidrio se moldea correctamente y no se deforma o rompe.

Además, la termografía se puede utilizar para identificar defectos en el vidrio, como burbujas o grietas, al medir las variaciones de temperatura en el vidrio. Esto permite a los fabricantes identificar y eliminar el vidrio defectuoso antes de su uso en la producción de vidrio terminado.

En contraste con el espectro de luz visible, el vidrio, en el espectro infrarrojo no es transparente, puesto que su factor de transmisión es muy bajo en el rango infrarrojo. Por lo tanto, en la mayoría de los casos es posible determinar la temperatura del vidrio sin emplear filtros, aunque en el caso de capas de vidrio más delgadas y altas temperaturas tras este, la radiación transmitida puede conducir a resultados de medición termográfica desproporcionadamente altos.

En resumen, la termografía es una herramienta valiosa en la industria del vidrio para garantizar la calidad y prevenir defectos durante la producción y el procesamiento del vidrio.

## 4.12 INDUSTRIA METALURGICA

Los procesos metalúrgicos, y especialmente los de la industria del aluminio, están asociados a un elevado consumo energético. Los sistemas de cámaras infrarrojas ayudan a detectar de forma rápida y precisa problemas de aislamiento en bandejas o dispositivos similares. La corrección de errores no solo reduce el consumo de energía durante el proceso, sino que también evita accidentes graves y altos costos causados por fugas de metal fundido en cubiles dañados.

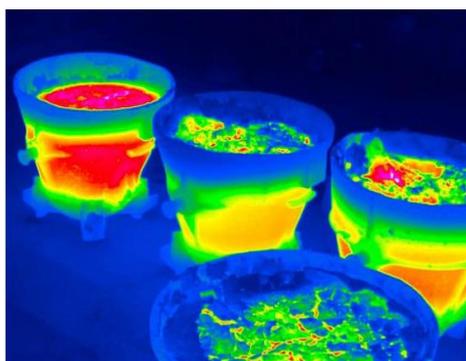


Figura 4.12.1: Imagen infrarroja de calderos con metal fundido. [19]

La termografía juega un papel fundamental en la industria metalúrgica, abarcando diversas aplicaciones que contribuyen a mejorar la eficiencia y la seguridad en los procesos de producción. En primer lugar, se emplea para inspeccionar hornos, fundiciones, laminadores y equipos de

procesamiento metalúrgico, permitiendo detectar puntos calientes y sobrecalentamientos que podrían indicar un mal funcionamiento o potencial fallo en los sistemas.

Asimismo, esta técnica se aplica en la inspección de piezas de maquinaria clave, como rodamientos y engranajes, para identificar posibles fallos ocasionados por el sobrecalentamiento y el desgaste, evitando así costosas averías y paradas de producción. La detección temprana de fugas en tuberías y tanques utilizados para el transporte y almacenamiento de metales y productos químicos también es posible gracias a la termografía, lo que previene problemas graves y potencialmente peligrosos en las instalaciones.

Otro aspecto esencial de la termografía en la industria metalúrgica es su capacidad para evaluar la calidad de los productos fabricados, como barras de acero y piezas fundidas, al detectar defectos como porosidades y grietas durante el proceso de producción, asegurando así la entrega de productos de alta calidad.

Finalmente, esta técnica de inspección no destructiva se utiliza para evaluar la integridad de estructuras metálicas, como puentes y edificios, al identificar posibles fallos y debilidades causadas por sobrecalentamiento y corrosión. En conjunto, la termografía se ha convertido en una herramienta esencial para la industria metalúrgica, proporcionando valiosa información que permite optimizar la producción, prevenir fallos y garantizar la seguridad en los procesos y estructuras metálicas.

## 4.13 INDUSTRIA DE LOS PLÁSTICOS

La termografía en la industria de los plásticos es una herramienta valiosa para el control de calidad y el monitoreo de procesos en la fabricación de piezas moldeadas. Tradicionalmente, la medición de temperatura en moldes y cuerpos moldeados se realizaba mediante sistemas de contacto, sin embargo, los sistemas de cámaras infrarrojas ofrecen una ventaja significativa al proporcionar una imagen completa de la distribución de temperatura de los cuerpos moldeados.

En la fabricación de piezas de plástico mediante inyección y embutición, la distribución de temperatura en los moldes es un aspecto crítico que influye en la calidad de los productos finales. La termografía permite detectar defectos como burbujas, vacíos y grietas en la superficie de las piezas, lo que contribuye a mejorar el control de calidad y garantizar la integridad de los productos.

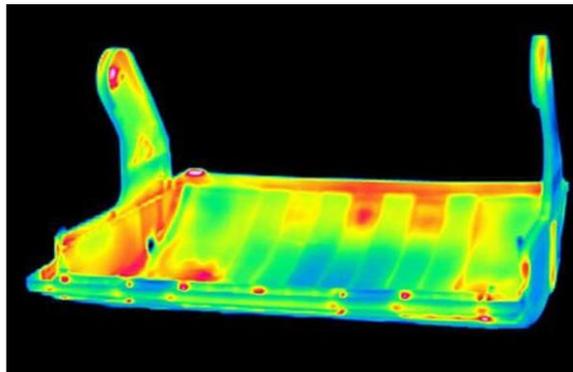


Figura 4.13.1: Imagen térmica de un molde. [19]

Además, la termografía se aplica en el control de procesos, permitiendo monitorear la temperatura durante la producción de plásticos y detectar posibles anomalías en el enfriamiento. Esto facilita la optimización de los procesos y mejora la calidad de los productos plásticos.

Otra aplicación relevante de la termografía en la industria de los plásticos es el análisis de fallas en componentes, como tuberías y conexiones. Mediante la detección de puntos calientes o fríos en la superficie, es posible identificar problemas en el flujo de fluidos y tomar medidas correctivas para evitar fallas en el sistema.

Además de su uso en control de calidad y monitoreo de procesos, la termografía se emplea para identificar los diferentes materiales que componen un producto de plástico, permitiendo detectar las diferentes temperaturas de fusión de los materiales y asegurando la calidad y consistencia de los productos.

## 4.14 INDUSTRIA MÉDICA

En el campo de la medicina, doctores y médicos han encontrado formas de usar las cámaras termográficas para ayudarles a proporcionar tratamientos más efectivos a sus pacientes. Imágenes médicas más precisas conducen a diagnósticos más específicos y por tanto más efectivos para sus pacientes.

El ser humano es homeotermo, es decir, presenta la capacidad de mantener su temperatura corporal constante independientemente de la temperatura ambiental, y produce calor. El medio de intercambio de ese calor con el exterior es la piel, que es un órgano capaz de equilibrar las condiciones externas e internas para satisfacer las necesidades fisiológicas del organismo. Los cambios en la conductividad

térmica de la piel provocados por quemaduras, úlceras o injertos pueden ser detectados y supervisados fácilmente con un sistema termográfico. Además, estos cambios en la piel también pueden ser debido a enfermedades dermatológicas por lo que estas pueden ser diagnosticadas fácilmente.

A parte de para evitar o pandemias, el uso de la termografía en la medicina se centra en prevenir enfermedades, ya que se pueden diagnosticar con mayor antelación evitando que sea tarde una vez se manifiesten síntomas más severos o difíciles de tratar. Por este motivo, estas técnicas de exploración son bienvenidas en el ámbito sanitario debido a que son métodos no invasivos, que no producen dolor al paciente y, sobre todo, no lo expone a radiación. Esto convierte a la tecnología termográfica un el sistema ideal para identificar patologías relacionadas con el sistema circulatorio o linfático, ya que las inflamaciones o la retención de líquidos provocan variaciones de la temperatura corporal.

Su alta efectividad a la hora de hacer exploraciones también hace que el uso de cámaras térmicas sea uno de los recursos esenciales para la detección de tumoraciones y el seguimiento de pacientes con cáncer, fundamentalmente en el cáncer de mama, uno de los cánceres con mayor número de víctimas y uno de los principales motivos de la muerte de mujeres. Gracias al uso de la termografía y a su temprana detección, cada vez está consiguiéndose un mejor diagnóstico, que facilita que se detecte a tiempo y sean cada vez más las mujeres que lo vencen.

En la industria médica, las cámaras termográficas han demostrado ser una herramienta invaluable para proporcionar tratamientos más efectivos a los pacientes. Estas cámaras permiten obtener imágenes médicas precisas que conducen a diagnósticos más específicos, lo que se traduce en un cuidado más efectivo y personalizado para los pacientes.

El ser humano es homeotermo, lo que significa que tiene la capacidad de mantener una temperatura corporal constante independientemente de las condiciones ambientales. La piel juega un papel crucial como medio de intercambio de calor con el entorno, equilibrando las condiciones internas y externas para satisfacer las necesidades fisiológicas del organismo. Los sistemas termográficos son capaces de detectar y supervisar cambios en la conductividad térmica de la piel, como los provocados por quemaduras, úlceras o injertos. Además, estos cambios también pueden estar relacionados con enfermedades dermatológicas, lo que permite un diagnóstico temprano y efectivo.

La termografía en la medicina no solo se enfoca en la prevención y control de pandemias, sino que también tiene un papel fundamental en la detección temprana de enfermedades. Al permitir diagnósticos tempranos, se pueden evitar complicaciones y síntomas más graves o difíciles de tratar.

Estas técnicas de exploración son altamente valoradas en el ámbito sanitario debido a su carácter no invasivo, libre de dolor y exento de radiación, lo que garantiza la seguridad y comodidad del paciente.

La tecnología termográfica resulta especialmente efectiva en la identificación de patologías relacionadas con el sistema circulatorio o linfático, ya que las inflamaciones o la retención de líquidos provocan variaciones en la temperatura corporal. Asimismo, su capacidad para realizar exploraciones de manera eficiente la convierte en una herramienta esencial para la detección y seguimiento de tumoraciones, especialmente en el cáncer de mama. La detección temprana de esta enfermedad gracias a la termografía ha contribuido significativamente a mejorar los pronósticos y las tasas de supervivencia, proporcionando una esperanza renovada para los pacientes.

## 4.15 GEOLOGÍA

La termografía aplicada a la geología es una técnica que se utiliza para estudiar y analizar las características térmicas de los suelos y formaciones geológicas. Esta tecnología se basa en la detección y medición de la radiación infrarroja emitida por los objetos en función de su temperatura.

En la geología, la termografía se emplea para obtener información sobre la composición y propiedades de los suelos, rocas y otras formaciones geológicas. La reflexión y emisión de radiación de estos materiales están influenciadas por factores como el contenido de minerales, la humedad, la estructura y el tamaño de las partículas.

Mediante cámaras termográficas o sensores infrarrojos, se capturan las imágenes térmicas que revelan variaciones en la temperatura de los suelos y formaciones geológicas. Estas diferencias térmicas pueden estar relacionadas con cambios en la composición del terreno, la presencia de minerales específicos, la humedad o incluso actividad geotérmica.

La termografía en geología tiene diversas aplicaciones, incluyendo la cartografía de zonas geológicas, la identificación de minerales y tipos de piedra, la detección de áreas con suelos consolidados frente a suelos sin consolidar, y el mapeo térmico de depósitos volcánicos recientes, entre otros.

Esta técnica proporciona información valiosa para entender la estructura y comportamiento del terreno, lo que resulta fundamental para proyectos de construcción, estudios geotécnicos, exploración de recursos naturales y la identificación de áreas con potencial geotérmico.

## 4.16 GANADERÍA, AGRICULTURA Y VIDA SILVESTRE

En el ámbito de la ganadería, agricultura y vida silvestre, la termografía ha demostrado ser una herramienta valiosa y versátil. En la actualidad, una de sus aplicaciones más comunes es el seguimiento de animales y la fotografía de vida silvestre, así como el monitoreo ambiental. Las cámaras infrarrojas equipadas con sensores pueden ser configuradas y colocadas sin vigilancia en hábitats naturales, lo que les permite dispararse automáticamente ante la presencia de vida nocturna o cualquier tipo de movimiento difícil de detectar. De esta manera, se facilita el seguimiento y análisis del comportamiento de diversas especies de una forma más sencilla, económica y sin necesidad de mano de obra constante.

En la cría de diferentes tipos de ganado, como el vacuno, porcino u ovino, la termografía infrarroja se ha convertido en una solución económica y efectiva en todas las fases del proceso. Permite evaluar la salud y el bienestar de los animales, identificar posibles problemas de salud o estrés térmico, y mejorar las condiciones de alojamiento para garantizar el óptimo rendimiento de la producción ganadera.

En el control de plagas, la tecnología termográfica también juega un papel importante. Se utiliza tanto en el campo como en el interior de paredes o estructuras para detectar plagas de pequeños mamíferos, como ratas o ratones, que son de sangre caliente y dejan trazas directas de su actividad en forma de calor. La termografía permite detectar áreas de actividad y puntos de entrada, lo que facilita la implementación de medidas de control de plagas de manera más precisa y eficiente.

El seguimiento de animales, el monitoreo ambiental y la fotografía de vida silvestre son usos muy comunes de la tecnología de imágenes térmicas hoy en día. Las cámaras infrarrojas se pueden equipar con sensores para ser configuradas y colocadas sin vigilancia en hábitats naturales, disparándose de forma automática en presencia de vida nocturna o de cualquier tipo de movimiento difícil de detectar. Así se pueden realizar seguimientos a las distintas especies, analizar su comportamiento y recorrido recorrido de una forma mucho más sencilla y económica, prescindiendo de mano de obra.

La termografía infrarroja se revela como una herramienta muy económica para aplicar en todas las fases de la cría de diferente ganado, como el vacuno, porcino u ovino.

La tecnología termográfica también es utilizada tanto en el campo como en el interior de paredes o estructuras para detectar plagas de pequeños mamíferos como ratas o ratones, pues son de sangre caliente y dejan por tanto trazas directas de su actividad en forma de calor. El proceso de detección de

plagas puede ser indirecto y mostrarse como defectos en el aislamiento, filtraciones de aire del exterior, conductos agrietados, pérdidas de frío y calor.

#### 4.17 TERMOGRAFÍA ESPECTRAL

Centrar las mediciones de temperatura en bandas espectrales de alta o baja emisividad puede conducir claramente a la detección de fenómenos particulares. Los filtros espectrales integrados en el sistema de cámara de imágenes térmicas permiten una transmisión clara o bloqueo de la radiación de bandas infrarrojas seleccionadas para minimizar la radiación de fondo interferente y reducir los errores de medición. En rangos espectrales donde la transmisión de material excepcionalmente alta se pueden obtener mediciones de temperatura de objetos detrás del material. Por ejemplo, de la temperatura del filamento de la lámpara se puede medir sin verse afectado por muchos de los cristales más fríos de la lámpara.

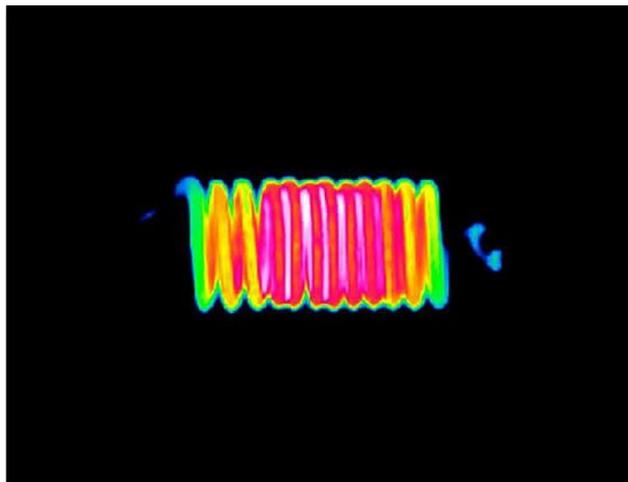


Figura 4.17.1: Imagen infrarroja del filamento de una bombilla situado tras un vidrio. [19]

Existe una serie de aplicaciones de la termografía espectral en diferentes sectores industriales, así como en el campo de la investigación y el desarrollo:

- **Reflectografía IR:** La reflectografía IR se utiliza para la detección de capas de pintura inferiores debido a su comportamiento espectral (capa superior transmisiva, dibujos inferiores reflectantes).

- **Detección de humedad:** Con la ayuda de la detección de humedad, por ejemplo, para el análisis de materiales de construcción en caso de siniestros, se define el factor de absorción espectral de la banda de agua.
- **Fugas:** Otra aplicación interesante es la detección de fugas en tanques utilizando gases detectables por IR. Un gas adecuado y disponible es el CO<sub>2</sub>, que tiene una fuerte banda de absorción a 4,25 μm. Un fondo templado ayuda a reconocer el flujo de gas saliente.
- **Medición de la temperatura de las llamas:** La temperatura de las llamas se puede estimar midiendo selectivamente dentro de la banda de absorción de CO<sub>2</sub> a 4,25 μm. La termografía en objetos detrás de la llama es posible utilizando el rango espectral de (3,75 ... 4) μm (por ejemplo, paredes de hornos o tuberías).
- **Proceso de extrusión de película:** La temperatura de la superficie de la película se puede medir usando un filtro de paso de banda a 3,4 μm (aplicable para varios plásticos, por ejemplo, polietileno, polipropileno, poliamida, polivinilo). Para algunos plásticos se puede utilizar una banda de absorción de 8 μm (LWIR).

## 4.18 TERMOGRAFÍA DE ALTA VELOCIDAD

Los sistemas de cámaras de infrarrojos rápidos con una velocidad de fotogramas de hasta algunos kHz abren las puertas de la termografía a nuevas aplicaciones.

El comportamiento térmico de los procesos de alta velocidad, como por ejemplo la optimización de la distribución de calor de los airbags una vez activados, se pueden monitorear y analizar. La termografía de alta velocidad con una frecuencia de fotogramas de más de 100 kHz se basa en detectores especiales (detectores instantáneos) con capacidad para adquirir y leer datos en paralelo y con precisión en un rango de milisegundos.

Principales aplicaciones de la termografía de alta velocidad:

- Análisis de estrés térmico de metales
- Termografía de procesamiento de CFRP
- Pruebas de tensión en alambres
- Optimización de aerogeneradores

## 4.19 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

La Termografía Infrarroja ha encontrado diversas aplicaciones en el campo de los ensayos no destructivos, permitiendo detectar e inspeccionar posibles defectos y anomalías en materiales compuestos y metales, así como en otros materiales plásticos y estructuras. Esta técnica se basa en la detección y medición de la radiación infrarroja emitida por los objetos en función de su temperatura, lo que permite visualizar y analizar de manera no invasiva posibles problemas internos o superficiales.

Uno de los campos en los que la Termografía Infrarroja ha tenido mayor difusión es en la inspección de fuselajes de aviones, donde es esencial garantizar la integridad estructural de las aeronaves. Además, ha demostrado ser efectiva en la detección de falta de adhesión en materiales compuestos, daños por impacto, porosidad y pérdida de espesor en estos materiales. Asimismo, es útil en la evaluación de la adherencia de parches y la detección de corrosión bajo la pintura, permitiendo identificar áreas afectadas sin dañar el recubrimiento.

En el caso de metales, la Termografía Infrarroja ha sido empleada para evaluar uniones, empalmes y acumulación de sarro, así como para analizar la soldadura por puntos. También ha sido una herramienta valiosa en el descubrimiento de corrosión oculta, que no es visible a simple vista pero que puede afectar la integridad de las estructuras metálicas.

Los ensayos no destructivos por termografía suelen llevarse a cabo mediante técnicas activas, donde se aplica un estímulo externo para obtener un contraste térmico relevante. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran la Termografía por pulsos, la Termografía por pulsos largos o calentamiento a pasos, la Termografía por ondas internas o Lockin, la Termografía con pulso en fase y la Termografía con estímulo de vibraciones externas.

Es importante destacar que el desarrollo de la Termografía Infrarroja como técnica no destructiva implica más que el simple uso de una cámara infrarroja. Cada material a ensayar requiere de equipamiento accesorio y procedimientos adecuados para obtener resultados precisos y confiables. Esto incluye la selección adecuada de la técnica de termografía a emplear, así como la preparación y calibración del equipo para cada tipo de ensayo.

## 4.20 ANÁLISIS DE TENSIÓN Y FATIGA

La termografía también se utiliza en el análisis de tensión y fatiga en diferentes materiales y estructuras cuya detección es crucial para prevenir el fallo de los materiales y garantizar su seguridad y fiabilidad a largo plazo.

En la detección de fatiga y tensiones, la termografía se utiliza para medir la temperatura de las estructuras en estados de carga. Cuando una estructura se somete a una carga cíclica se forman pequeñas fisuras y grietas que generan calor debido a la fricción y las deformaciones internas. Las zonas que desprenden mayor cantidad de calor son las que se encuentran sometidas a compresión mientras que las que desprenden una menor cantidad son las que se encuentran sometidas a tracción. Las cámaras infrarrojas más sensibles, de alta resolución y con electrónica digital especial de gran velocidad pueden detectar estos cambios de temperatura y convertirlos en una imagen térmica que muestra la distribución de las fisuras y grietas y tensiones en el material.

La capacidad de la termografía para detectar tensiones y fatiga de manera no destructiva y en tiempo real la hace una herramienta valiosa para la evaluación y el mantenimiento de estructuras y materiales a lo largo de su vida útil.

## 4.21 SISTEMAS ELECTRÓNICOS

La termografía es un instrumento útil en el estudio de los fenómenos térmicos aplicada al diseño electrónico. Los dispositivos electrónicos siempre producen calor residual que aumenta con el transcurso del tiempo de funcionamiento. La tendencia en reducir el tamaño de los circuitos y elevar la densidad de componentes en una tarjeta, conlleva la necesidad de hacer un manejo adecuado de la disipación de energía térmica para mantener el sistema en un rango de temperatura aceptable sin que ocurran fallos críticos. La información que esta técnica es capaz de ofrecer es muy útil para las empresas en la elaboración de reportes técnicos y guías para el usuario. En resumen, la termografía es comparativamente mejor para el estudio y la identificación de anomalías térmicas que las técnicas tradicionales basadas en el uso de termopares en puntos de medición, principalmente porque permiten grabar los fenómenos en función del tiempo. Sin embargo, la termografía requiere de personal altamente capacitado con conocimiento del coeficiente de emisión de las partes del circuito, rangos de trabajo y disipación de calor entre otros.

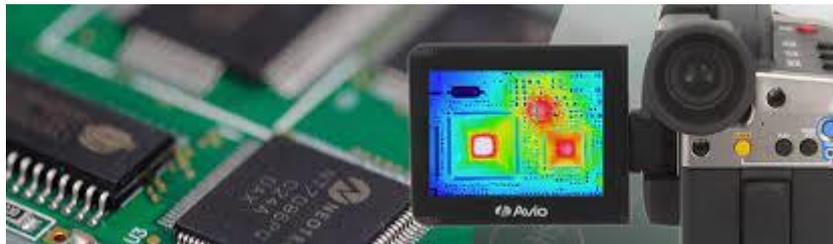


Figura 4.21.1: Uso de la cámara termográfica en un circuito integrado. [22]

Las aplicaciones más comunes son la producción de placas de circuito impreso y la conexión de cables en circuitos integrados; los ingenieros emplean las cámaras termográficas para supervisar el perfil térmico de los circuitos impresos y en función de los resultados realizar las modificaciones necesarias para un mejorar su rendimiento.

Otras aplicaciones en sistemas electrónicos son:

- Estudio de componentes
- Estudios comparativos de carga
- Cálculo de refrigeradores y radiadores
- Dimensionado de componentes
- Investigación y desarrollo de nuevos sistemas

## 4.22 PEGADO Y SELLADO

Las mezclas de materiales innovadores hechos de compuestos de fibra están desempeñando un papel cada vez más importante en los diseños de productos de consumo y la industria ligera. Muchos tipos de materiales compuestos, como el plástico reforzado con fibra de carbono (CFRP) y el plástico reforzado con fibra de vidrio (GFRP), se combinan con aluminio y magnesio, así como con aceros de alta y súper alta resistencia. La combinación de tales mezclas de múltiples componentes impone exigencias muy altas a las tecnologías y fabricantes involucrados. El pegado y sellado son es la principal tecnología de unión de elementos junto con el remachado, el atornillado y el remachado. Las superficies de contacto de grandes dimensiones facilitan la aplicación de compuestos adhesivos brindando la posibilidad de reducir el peso de los conjuntos peso menor.

La termografía infrarroja se ha utilizado en la industria de la unión y el sellado durante muchos años para monitorear y controlar los parámetros del proceso, como la geometría del aglutinante, las temperaturas del adhesivo y de la unión, así como el grado de endurecimiento por calor. La calidad de una determinada junta se puede examinar de forma no destructiva utilizando imágenes capturadas por una cámara termográfica de alta resolución térmica y geométrica. Esto brinda a los fabricantes la oportunidad conformar componentes livianos aún más complejos, incluidas estructuras y compuestos parciales de múltiples capas.

Los errores en el pegado y sellado que se pueden detectar mediante el uso de sistemas termográficos son:

- Errores en la aplicación, temperatura y cantidad del adhesivo.
- Errores en la temperatura de la temperatura adherente.
- Errores de forma/tamaño de las zonas de unión (componentes parcialmente unidos)
- Errores de posición con referencia a herramientas colocadas incorrectamente y piezas unidas.
- Fallos en el proceso de curado y enfriamiento, así como en el control de la temperatura del molde.
- Defectos materiales, cavidades, inclusiones, agujeros, etc.
- Delaminación.

---

# 5 Inspecciones termográficas

---

## 5.1 INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA DE UN ALTERNADOR

En febrero de 2023, tuve el privilegio de llevar a cabo una rigurosa inspección termográfica en el alternador del patrullero “Tabarca”, en colaboración con Adrián Rodríguez Fernández, un termógrafo certificado de la empresa ALYCAR ELECTRICIDAD S.L.

Durante el transcurso de la inspección, recopilamos una amplia gama de datos termográficos, los cuales posteriormente analizamos minuciosamente. Bajo la guía experta de Adrián, realizamos un análisis exhaustivo del alternador, explorando con minuciosidad cada componente y evaluando los patrones térmicos para detectar posibles irregularidades que pudieran afectar su rendimiento óptimo. Adrián demostró su vasto conocimiento y experiencia en la interpretación precisa de las imágenes térmicas, guiándome en la identificación de áreas de interés, zonas con temperaturas atípicas y posibles causas subyacentes de dichos patrones térmicos. Juntos, logramos identificar puntos críticos y tomamos decisiones fundamentadas acerca de las acciones de mantenimiento requeridas para asegurar el óptimo funcionamiento del alternador y, en última instancia, del sistema de generación de energía del patrullero.

Esta experiencia no solo me brindó un valioso conocimiento práctico en el campo de la termografía, sino que también consolidó mi comprensión acerca de la importancia capital de esta técnica en la industria naval. Agradezco la orientación, pericia y tiempo invertido por Adrián a lo largo de todo el proceso, y estoy convencido de que esta inspección termográfica constituirá una contribución relevante tanto a mi Trabajo de Fin de Grado como a mi desarrollo profesional en el ámbito de la ingeniería mecánica.

### 5.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PATRULLERO TABARCA (P-28)



Figura 5.1.1: Patrullero P28 Tabarca de maniobras en Corcubión [23]

"El buque" fue construido por la "Empresa Nacional Bazán" (actual "Navantia") en San Fernando (Cádiz). Fue botado el día 23 de diciembre de 1980 y entregado a la Armada el 31 de diciembre de 1981. Es el primer buque de la Armada con el nombre "Anaga", que se corresponde con el nombre de una pequeña isla de la provincia de Alicante. Es el octavo buque de la serie "ANAGA" compuesta inicialmente de diez unidades de las que actualmente quedan cuatro.

El buque dispone de 1 camarote para el Comandante, 1 camarote de oficiales, 1 camarote de suboficiales y sollados para la marinería. Además de las patrullas y maniobras que se realizan en la mar, el horario en puerto se divide entre la realización de mantenimientos preceptivos, alistamiento para el combate e instrucción y adiestramiento de la dotación.

Este patrullero tiene como base la Escuela Naval Militar de Marín (Pontevedra) y tiene como propósito:

- Vigilancia de costa
- Vigilancia de caladeros de pesca nacionales
- Vigilancia de Zona Económica Exclusiva
- Colaboración activa con la Escuela Naval Militar para el adiestramiento de los futuros Oficiales de la Armada, así como con unidades especiales del Ejército de Tierra y de la Armada

Tabla 5.1.1: Características patrullero tabarca (P-28). [24]

CARACTERÍSTICAS PATRULLERO TABARCA (P-28)	
<b>Desplazamiento</b>	320 toneladas
<b>Eslora</b>	44,26 m
<b>Manga</b>	6,60 m
<b>Propulsión</b>	1 motor principal BAZÁN MTU 16V 956 TB91 4.500CV. a 1.500 rpm 2 motores auxiliares diésel CHRISLER-BARREIROS tipo BS-36ME de 1500 rpm sobrealimentados
<b>Dotación</b>	27 (1 TN Comandante, 3 Oficiales, 4 suboficiales, 6 cabos primeros, 4 cabos y 9 marineros)
<b>Armamento</b>	1 cañón 3"/50 1 Ametralladora OERLIKON 20m 2 Ametralladoras MG de 7.62 mm
<b>Sensores</b>	Radar de navegación CONSILIUM SELESMAR MOD. 10NB-001M/S. Radar de navegación SPERRY MOD. TIPO ID-1216-1 Corredera SAGEM MOD. LCHS Sondador acústico HRM
<b>Otros</b>	GPS KODEN KP-98 GPS GARMIN 2006C Giroscópica NAVIGAT X MK2

### 5.1.2 PREPARACIÓN DEL EQUIPO DE INSPECCIÓN

Para llevar a cabo la inspección termográfica del alternador en el patrullero, contamos con la cámara termográfica Fluke Ti450 SF6, proporcionada por la Universidad de León. Esta cámara termográfica

está especialmente preparada para realizar inspecciones en equipos eléctricos de alta tensión, lo que la hace adecuada para la inspección del alternador.

Antes de comenzar la inspección, verificamos el estado y calibración de la cámara para garantizar su correcto funcionamiento y la confiabilidad de las mediciones obtenidas. La cámara Fluke Ti450 SF6 nos permitió capturar imágenes termográficas claras y detalladas del alternador.

Durante la inspección, ajustamos los parámetros de la cámara según las condiciones específicas del entorno y los requisitos de la inspección. Configuramos la temperatura de referencia adecuada y establecimos la escala de colores óptima para obtener imágenes de alta calidad.

Realizamos la captura de imágenes termográficas desde diferentes ángulos y perspectivas, prestando especial atención a las áreas críticas y componentes relevantes del alternador. Cubrimos todas las partes del alternador para obtener datos termográficos completos y representativos.

Durante el proceso de captura, contamos con la guía experta de Adrián para interpretar correctamente los patrones térmicos y detectar posibles anomalías. Analizamos las imágenes en tiempo real y evaluamos conjuntamente los resultados obtenidos.

Una vez finalizada la captura de imágenes, descargamos los datos de la cámara y los procesamos utilizando el software correspondiente. Realizamos un minucioso análisis de las imágenes, extrayendo mediciones de temperaturas y generando informes detallados para documentar los hallazgos.

Gracias a la calidad y funcionalidades de la cámara termográfica Fluke Ti450 SF6, así como a la guía experta de Adrián, obtuvimos datos confiables y una visión clara de la salud térmica del alternador. Estos resultados nos permitieron tomar las acciones de mantenimiento necesarias para garantizar su óptimo rendimiento en el patrullero.

### 5.1.3 RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN

CONDICIONES DE LA INSPECCIÓN			
<b>Descripción</b>	Evaluación del estado de un alternador del patrullero de TABARCA		
<b>Fecha de inspección</b>	08/02/2023 10:27:38	<b>Condiciones meteorológicas</b>	Día nublado
<b>Ubicación</b>	Astillero de Fene, propiedad de Navantia	<b>Zona</b>	Astillero de

<b>Temperatura ambiente interior</b>	20,2°C	<b>Temperatura ambiente exterior</b>	10,3°C
<b>Humedad relativa interior</b>	55 %	<b>Humedad relativa exterior</b>	55 %
<b>Punto de rocío interior</b>	5,0°C	<b>Prioridad de reparación</b>	Alta
<b>Emisividad</b>	0,95	<b>Temperatura reflejada</b>	22,0°C
<b>Fabricante</b>	Fluke Thermography	<b>Cámara</b>	Ti450 SF6 -

Durante la inspección termográfica del estator del alternador del patrullero, se identificaron dos zonas con temperaturas superiores a las de las superficies adyacentes. Estas zonas se denominan "A" y "EI", y presentan temperaturas promedio aproximadas de 39 °C y 28 °C, respectivamente, mientras el alternador está en funcionamiento. Dentro de las zonas “A” y “EI” se realiza un desglose de las temperaturas de subzonas, tal y como muestra la Figura 5.1.2 y la Figura 5.1.3, dónde la información se presenta en la Tabla 5.1.2 y la Tabla 5.1.3.

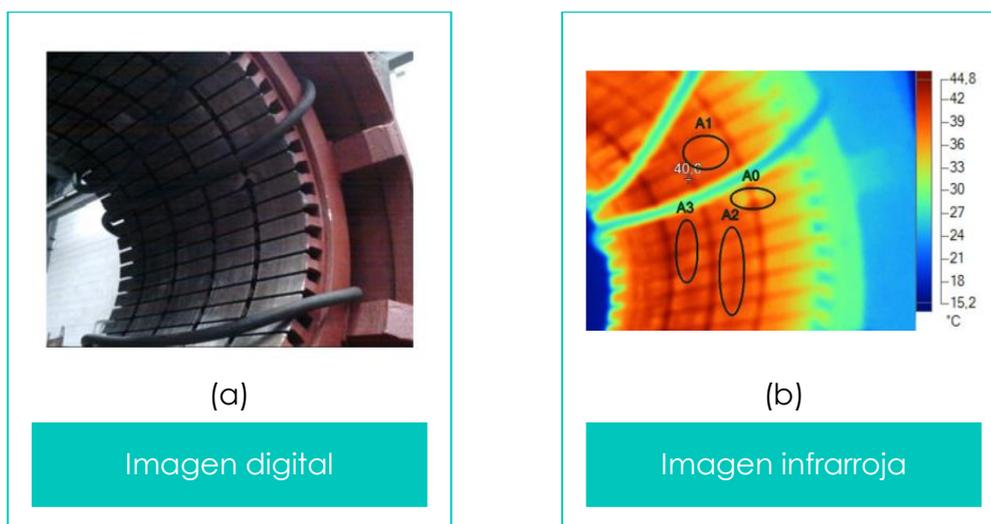


Figura 5.1.2: Imagen digital (a) e infrarroja (b), desde una perspectiva frontal y cercana, del estátor de un alternador usado en el patrullero Tabarca. [25]

Tabla 5.1.2: Cuadro de distribución de temperaturas de la zona "EI". [25]

Denominación	Promedio	Mínimo	Máximo
<b>A0</b>	36,7 °C	34,2 °C	41,4 °C
<b>A1</b>	39,2 °C	37,0 °C	41,0 °C
<b>A2</b>	39,6 °C	38,1 °C	41,3 °C
<b>A3</b>	40,6 °C	37,8 °C	42,7 °C

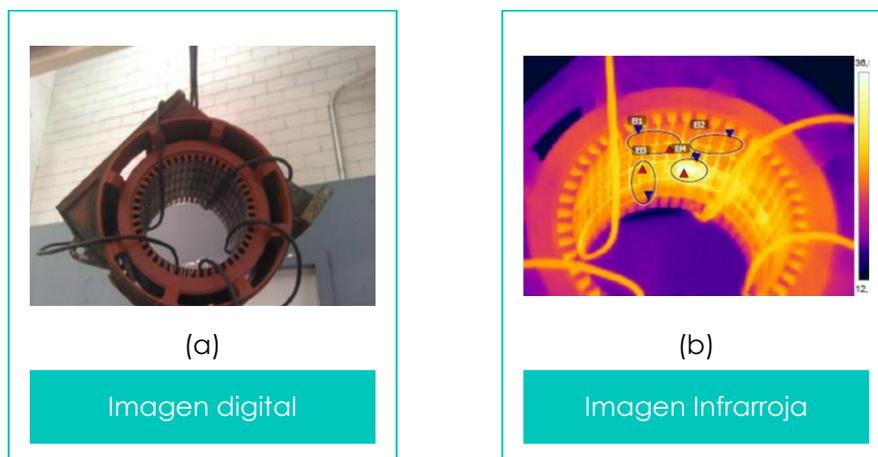


Figura 5.1.3: Imagen digital (a) e infrarroja (b), desde una perspectiva frontal, del estátor de un alternador usado en el patrullero Tabarca. [25]

Tabla 5.1.3: Cuadro de distribución de temperaturas de la zona "EI". [25]

Denominación	Promedio	Mínimo	Máximo
<b>EI1</b>	25,7 °C	23,3 °C	29,7 °C
<b>EI2</b>	25,9 °C	24,2 °C	30,7 °C
<b>EI3</b>	26,6 °C	20,4 °C	31,0 °C
<b>EI4</b>	32,8 °C	26,7 °C	39,3 °C

Para determinar si estas temperaturas son aceptables o no, es necesario compararlas con los límites de temperatura establecidos por el fabricante del alternador y las normas de referencia aplicables. Estas especificaciones pueden variar dependiendo del diseño y las características del alternador en cuestión. En general, los aumentos de temperatura en ciertas zonas pueden ser normales debido a la naturaleza del funcionamiento del alternador y las pérdidas de calor asociadas.

La temperatura promedio de la zona "A" de 39 °C podría considerarse dentro de un rango aceptable, siempre y cuando no supere los límites establecidos por el fabricante. Sin embargo, es importante evaluar otros factores, como el tiempo de funcionamiento y las condiciones de carga, para determinar si esta temperatura se mantiene estable o si aumenta gradualmente.

Por otro lado, la temperatura promedio de la zona "EI" de 28 °C parece indicar una diferencia de temperatura menor en comparación con la zona "A".

## 5.2 INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA INSTALACIONES DE BAJA TENSIÓN

### 5.2.1.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este documento es presentar los resultados del análisis termográfico realizado el 15 de febrero de 2023 en las instalaciones de LATEM Aluminium, ubicadas en el polígono de Villadangos (León). El propósito de esta inspección fue identificar posibles puntos calientes y malfuncionamientos en los cuadros eléctricos de la empresa, con el fin de predecir y prevenir futuras fallas que podrían tener un impacto negativo en sus operaciones.

LATEM Aluminium, como empresa dedicada al procesado de aluminio, depende en gran medida de un suministro eléctrico confiable y eficiente para llevar a cabo sus procesos de fabricación y producción. Los cuadros eléctricos desempeñan un papel fundamental en la distribución de energía y el control de los equipos utilizados en estas actividades.

Un malfuncionamiento en los cuadros eléctricos puede dar lugar a interrupciones en el suministro eléctrico, lo que podría generar paradas de producción, retrasos en los pedidos y pérdida de clientes. Además, fluctuaciones en los niveles de potencia pueden afectar la calidad del producto final, comprometiendo la consistencia y las especificaciones requeridas.

Es importante destacar que los fallos en los cuadros eléctricos también representan un riesgo para la seguridad de los empleados y las instalaciones. Cortocircuitos, sobrecalentamientos y otros problemas eléctricos pueden causar incendios o daños en los equipos, poniendo en peligro la integridad de las personas y la continuidad de las operaciones.

Mediante la utilización de cámaras termográficas durante la inspección, se buscó detectar posibles anomalías en los cuadros eléctricos, como puntos calientes, fluctuaciones de temperatura y otros indicadores de malfuncionamiento. Esto permitió tomar medidas preventivas y correctivas para evitar futuros problemas, garantizando un suministro eléctrico estable, una producción consistente y un entorno seguro.

### 5.2.1.2 ALCANCE DE LA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA

El alcance de la inspección termográfica realizada en las instalaciones de LATEM Aluminium fue exhaustivo, abarcando la revisión de todos los cuadros eléctricos presentes en la planta. Se aplicaron

los procedimientos y estándares recomendados para garantizar una evaluación precisa y detallada de los equipos.

Para llevar a cabo esta inspección, se utilizó una cámara termográfica de alta resolución y sensibilidad. Las especificaciones técnicas de la cámara seleccionada se detallan en el Anexo I adjunto a este informe.

La cámara termográfica empleada cuenta con una resolución de imagen de [especificar resolución] píxeles, lo que permitió capturar imágenes claras y detalladas de los cuadros eléctricos inspeccionados. Además, cuenta con una sensibilidad térmica de [especificar sensibilidad] °C, lo que permitió detectar incluso las diferencias de temperatura más sutiles.

La cámara termográfica también dispone de funciones avanzadas, como el ajuste manual de intervalo y nivel, que garantizaron la obtención de imágenes con un contraste térmico óptimo. Asimismo, se utilizó la función DDE (Digital Detail Enhancement) para optimizar el contraste de la imagen y facilitar la detección de posibles puntos calientes o anomalías.

Durante la inspección, se tuvo en cuenta la irradiancia solar necesaria para obtener resultados precisos. Se realizó la medición de irradiancia solar para asegurar que se cumplieran las condiciones adecuadas para el análisis termográfico.

El equipo de inspección, compuesto por expertos en termografía y electricidad, llevó a cabo la revisión de los cuadros eléctricos siguiendo un enfoque sistemático y detallado. Se examinaron minuciosamente las conexiones, los componentes eléctricos y los puntos críticos en cada cuadro eléctrico.

Es importante destacar que esta inspección termográfica se realizó en funcionamiento normal de los equipos, sin necesidad de interrumpir la producción o apagar los sistemas eléctricos. Esto permitió evaluar el rendimiento y detectar posibles fallos en condiciones reales de operación.

## **5.2.2 CRITERIO DE CLASIFICACIÓN DE AVERÍAS**

En el informe de inspección termográfica, se particularizará el criterio establecido por la NETA (International Electrical Testing Association) para obtener una mayor precisión en la clasificación de las averías. En lugar de utilizar un único criterio general, se emplearán cuatro niveles de clasificación para categorizar las anomalías detectadas. Estos niveles se determinarán en base a la diferencia de

temperatura entre componentes similares bajo cargas similares, proporcionando una evaluación más detallada y precisa de la gravedad de la avería.

Es importante tener en cuenta que esta clasificación puede variar según las directrices específicas de cada organización y las características del sistema bajo inspección. Además, se recomienda contar con profesionales capacitados y seguir las normativas y estándares correspondientes al realizar la evaluación y las acciones correctivas.

Los cuatro niveles de clasificación se definen de la siguiente manera:

- **Nivel de gravedad baja:** Se aplica cuando la diferencia de temperatura entre componentes similares bajo cargas similares es menor o igual a 5°C. Indica una anomalía mínima y generalmente no se considera una preocupación significativa.
- **Nivel de gravedad media:** Se asigna cuando la diferencia de temperatura entre componentes similares bajo cargas similares se encuentra entre 5°C y 15°C. Indica una anomalía moderada que puede requerir seguimiento o acciones preventivas.
- **Nivel de gravedad alta:** Se utiliza cuando la diferencia de temperatura entre componentes similares bajo cargas similares está entre 15°C y 35°C. Indica una anomalía significativa que requiere atención inmediata y medidas correctivas para evitar posibles fallos futuros.
- **Nivel de gravedad crítica:** Se aplica cuando la diferencia de temperatura entre componentes similares bajo cargas similares supera los 35°C. Indica una anomalía grave que representa un alto riesgo de fallo inminente y requiere una acción correctiva urgente.

O alternativamente, en función de los rangos de diferencia de temperatura ambiente y temperatura del punto caliente:

- **Avería de gravedad baja:** La diferencia de temperatura entre el punto caliente y la temperatura ambiente es menor o igual a 10°C.
- **Avería de gravedad media:** La diferencia de temperatura entre el punto caliente y la temperatura ambiente se encuentra entre 10°C y 20°C. Recomendación: Realizar un seguimiento y monitoreo continuo, planificar una inspección adicional en el futuro para evaluar cualquier cambio en la temperatura.

- **Avería de gravedad alta:** La diferencia de temperatura entre el punto caliente y la temperatura ambiente está entre 20°C y 40°C. Recomendación: Programar una inspección más detallada para identificar y diagnosticar el problema específico, realizar las reparaciones necesarias lo antes posible.
- **Avería de gravedad crítica:** La diferencia de temperatura entre el punto caliente y la temperatura ambiente supera los 40°C. Recomendación: Tomar medidas inmediatas para solucionar el problema, ya que puede representar un riesgo grave para la seguridad y el rendimiento del sistema.

Esta clasificación detallada permite una mejor evaluación de las averías detectadas en función de su gravedad y proporciona una guía clara sobre las acciones necesarias para mitigar los riesgos y mantener la integridad del sistema eléctrico.

### 5.2.3 DATOS PRESENTADOS

En los resultados obtenidos en la inspección termográfica realizada en las instalaciones de LATEM Aluminium, se incluye la siguiente estructura de datos:

- **Información general o cabecera:** Contiene los datos identificativos de la termografía, como la fecha de realización, la ubicación de la inspección y los detalles del cliente.
- **Medidas tomadas y análisis de datos:** Se muestran las medidas tomadas utilizando la cámara termográfica, incluyendo la temperatura máxima del punto más caliente detectado en el termograma ( $T_{m\acute{a}x}$  "Ar1"), la temperatura del segundo punto más caliente sometido a cargas similares al punto más caliente ( $T_{m\acute{a}x}$  "Sp1") y la diferencia de temperaturas entre el punto "Ar1" y "Sp1" ( $\Delta T$  "Dt1" =  $T_{m\acute{a}x}$  "Ar1" -  $T_{m\acute{a}x}$  "Sp1").
- **Termograma:** Se muestra la imagen termográfica donde se resalta el punto caliente, el punto de referencia y la línea de comparación. Esta representación visual permite identificar claramente las áreas problemáticas.
- **Fotografía ordinaria:** Se adjunta una fotografía normal del área inspeccionada donde se indica el punto caliente detectado durante la termografía.
- **Cálculos y clasificación de la avería:** Se presentan los cálculos realizados según los criterios establecidos, lo que permite clasificar la avería detectada y determinar la acción recomendada.

- **Información sobre el posible fallo:** Se proporciona una descripción precisa de la ubicación y naturaleza del fallo detectado durante la inspección termográfica.
- **Recomendaciones:** El analista de Renovetec proporciona recomendaciones específicas basadas en los resultados y las clasificaciones obtenidas, con el objetivo de abordar y solucionar los problemas identificados durante la inspección termográfica.

## 5.2.4 EVALUACIONES TERMOGRÁFICAS

Con el objetivo de presentar los resultados de manera clara y concisa, se ha decidido mostrar únicamente un termograma que ejemplifique cada nivel de gravedad de los defectos encontrados en los cuadros eléctricos.

Esta elección metodológica se fundamenta en la experiencia y conocimientos adquiridos por el equipo de expertos en termografía de Renovetec, quienes han determinado que seleccionar un único termograma representativo para cada nivel de severidad resulta altamente efectivo para comunicar la magnitud del defecto identificado en el cuadro eléctrico. Además, esta estrategia permite una presentación ordenada y fácil de interpretar para los lectores del TFG.

Es relevante mencionar que, aunque se muestre solo un termograma por nivel de gravedad, esto no implica que se hayan ignorado otros defectos encontrados durante la inspección. Durante el proceso de termografía, se realizó una evaluación exhaustiva de todas las áreas pertinentes, y se registraron y clasificaron detalladamente todos los defectos identificados.

La selección de un único termograma ejemplificando cada nivel de severidad se ajusta al enfoque del TFG, ya que permite concentrarse en la comprensión y análisis detallado de los resultados más significativos obtenidos durante la inspección termográfica. Además, facilita el proceso de revisión y análisis para los lectores del TFG, permitiéndoles enfocarse en los aspectos más relevantes de la investigación.

### 5.2.4.1 EVALUACIÓN N°1

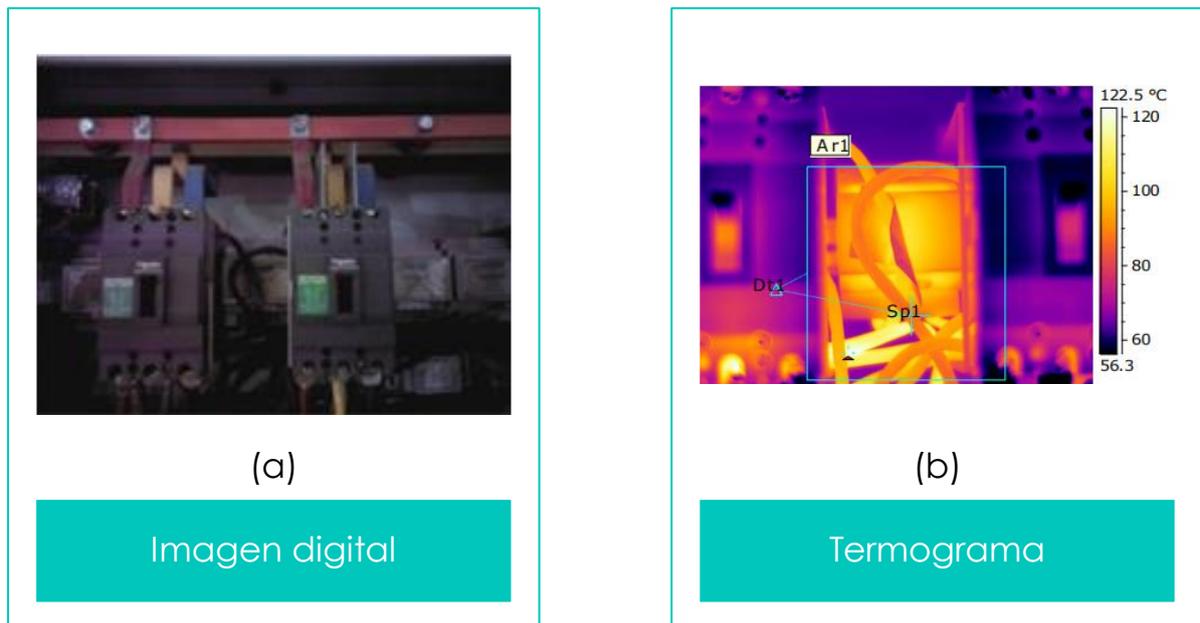


Figura 5.2.1: Imagen digital (a) e (b) infrarroja de un cuadro eléctrico de baja tensión con un defecto de nivel de gravedad “Crítico”. [25]

Tabla 5.2.1: Información sobre la evaluación termográfica N°1. [25]

INFORMACIÓN GENERAL		CONDICIONES		MEDIDAS	
<b>Ubicación</b>	Área de carga	$T_{amb}$	20,5 °C	$T_{m\acute{a}x}$ “Ar1”	122,5 °C
<b>Equipo</b>	AC-04	<b>Humedad relativa</b>	52 %	$T_{m\acute{a}x}$ “Sp1”	87,2 °C
<b>Nombre del archivo</b>	FLUKE0023.jpg	<b>Emisividad</b>	0,90	$\Delta T$ “Dt1”	35,3°C
<b>Fecha</b>	18/02/2023	<b>Distancia</b>	0,9 m		
<b>Hora</b>	8:45:21				

Tabla 5.2.2: Nivel de gravedad del defecto detectado en la evaluación termográfica N°1. [25]

NIVEL DE GRAVEDAD	RECOMENDACIÓN	MARCADOR
<b>Bajo</b> ( $\Delta T = 0 - 5$ °C)	Ninguna acción necesaria	
<b>Medio</b> ( $\Delta T = 5 - 15$ °C)	Realizar seguimiento	
<b>Alto</b> ( $\Delta T = 15 - 35$ °C)	Acción correctiva inmediata	
<b>Crítico</b> ( $\Delta T \geq 35$ °C)	Acción correctiva urgente	

Tabla 5.2.3: Posibles causas del defecto de la evaluación N°1 y acciones correctivas. [25]

ANÁLISIS	ACCIÓN CORRECTIVA
La imagen térmica anterior revela la presencia de múltiples fallos críticos en los filtros y cables (Ar1), los cuales se encuentran sometidos a altas temperaturas.	Durante la carga máxima, la temperatura de referencia del conductor aislado y la superficie del recinto (Ar1 de la imagen térmica) no debe superar los 50°C.

### 5.2.4.2 EVALUACIÓN N°2

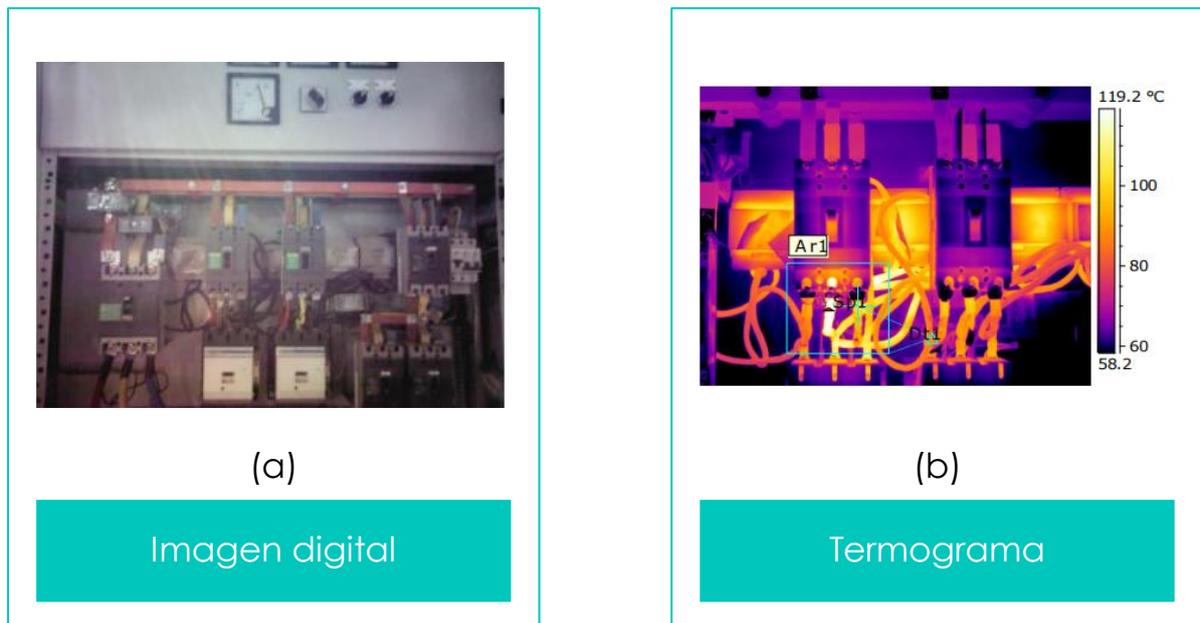


Figura 5.2.2: Imagen digital (a) e infrarroja (b) de un cuadro eléctrico de baja tensión con un defecto de nivel de gravedad “Alto”. [25]

Tabla 5.2.4: Información sobre la inspección termográfica N°2. [25]

INFORMACIÓN GENERAL		CONDICIONES		MEDIDAS	
<b>Ubicación</b>	Área de carga	$T_{amb}$	20,5 °C	$T_{m\acute{a}x}$ “Ar1”	136,5 °C
<b>Equipo</b>	AC-04	<b>Humedad relativa</b>	52 %	$T_{m\acute{a}x}$ “Sp1”	104,5 °C
<b>Nombre del archivo</b>	FLUKE0026.jpg	<b>Emisividad</b>	0,90	$\Delta T$ “Dt1”	33,0 °C
<b>Fecha</b>	18/02/2023	<b>Distancia</b>	0,9 m		
<b>Hora</b>	8:52:23				

Tabla 5.2.5: Nivel de gravedad del defecto detectado en la inspección termográfica N°2. [25]

NIVEL DE GRAVEDAD	RECOMENDACIÓN	MARCADOR
<b>Bajo</b> ( $\Delta T = 0 - 5 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Ninguna acción necesaria	
<b>Medio</b> ( $\Delta T = 5 - 15 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Realizar seguimiento	
<b>Alto</b> ( $\Delta T = 15 - 35 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Acción correctiva inmediata	
<b>Crítico</b> ( $\Delta T \geq 35 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Acción correctiva urgente	

Tabla 5.2.6: Posibles causas del defecto de la evaluación N°2 y acciones correctivas. [25]

ANÁLISIS	ACCIÓN CORRECTIVA
La imagen térmica anterior revela la presencia de múltiples fallos críticos en los filtros y cables (Ar1), los cuales se encuentran sometidos a altas temperaturas.	Durante la carga máxima, la temperatura de referencia del conductor aislado y la superficie del recinto (Ar1 de la imagen térmica) no debe superar los 50°C.

### 5.2.4.3 EVALUACIÓN N°3

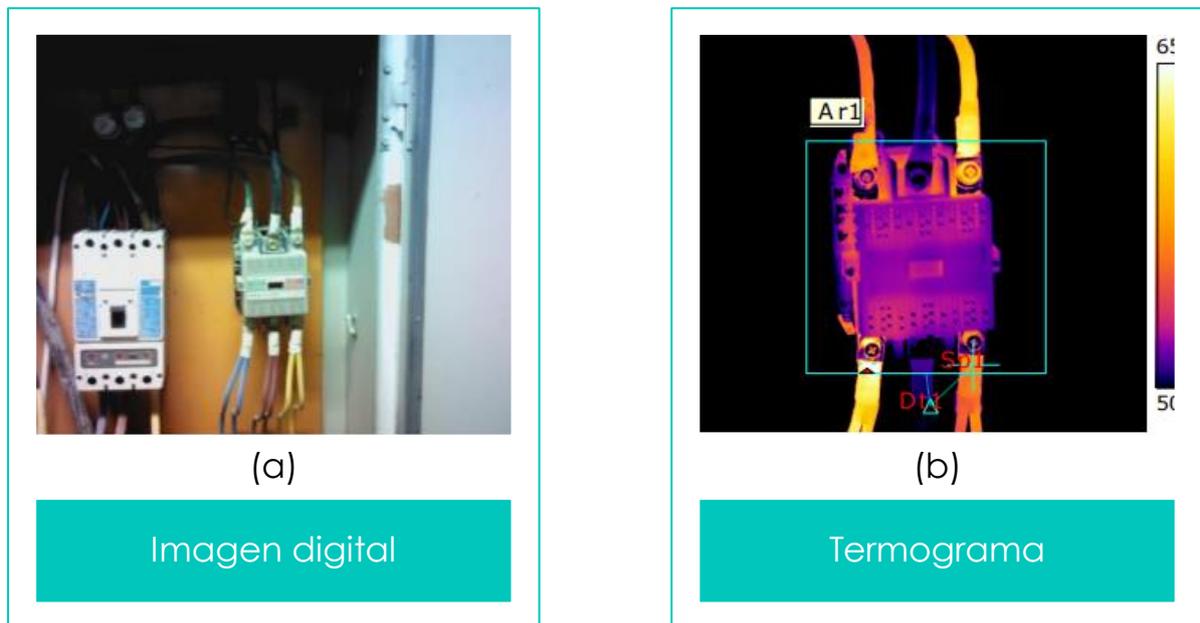


Figura 5.2.3: Imagen digital (a) e infrarroja (b) de un cuadro eléctrico de baja tensión con un defecto de nivel de gravedad “Medio”. [25]

Tabla 5.2.7: Información sobre la inspección termográfica N°3. [25]

INFORMACIÓN GENERAL		CONDICIONES		MEDIDAS	
<b>Ubicación</b>	Área de Control	$T_{amb}$	20,5 °C	$T_{m\acute{a}x}$ “Ar1”	65,7 °C
<b>Equipo</b>	SC-01	<b>Humedad relativa</b>	52 %	$T_{m\acute{a}x}$ “Sp1”	57,5 °C
<b>Nombre del archivo</b>	FLUKE0016.jpg	<b>Emisividad</b>	0,90	$\Delta T$ “Dt1”	8,7 °C
<b>Fecha</b>	18/02/2023	<b>Distancia</b>	0,9 m		
<b>Hora</b>	8:31:56				

Tabla 5.2.8: Nivel de gravedad del defecto de la inspección termográfica N°3. [25]

NIVEL DE GRAVEDAD	RECOMENDACIÓN	MARCADOR
<b>Bajo</b> ( $\Delta T = 0 - 5 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Ninguna acción necesaria	
<b>Medio</b> ( $\Delta T = 5 - 15 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Realizar seguimiento	
<b>Alto</b> ( $\Delta T = 15 - 35 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Acción correctiva inmediata	
<b>Crítico</b> ( $\Delta T \geq 35 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Acción correctiva urgente	

Tabla 5.2.9: Posibles causas del defecto de la evaluación N°3 y acciones correctivas. [25]

ANÁLISIS	ACCIÓN CORRECTIVA
El punto caliente detectado en la imagen térmica mostrada anteriormente corresponde al cable del lado de carga secundario del contactor magnético (fase R) (Ar1), el cual presenta una alta temperatura.	En carga máxima, la temperatura de referencia del conductor aislado y la superficie de la carcasa (Ar1 de la imagen térmica) no debe superar los 50°C. Se recomienda mantenerlo bajo monitoreo y verificar la corriente de carga en la fase R del contactor. Se sugiere realizar otra inspección termográfica.

### 5.2.4.4 EVALUACIÓN N°4

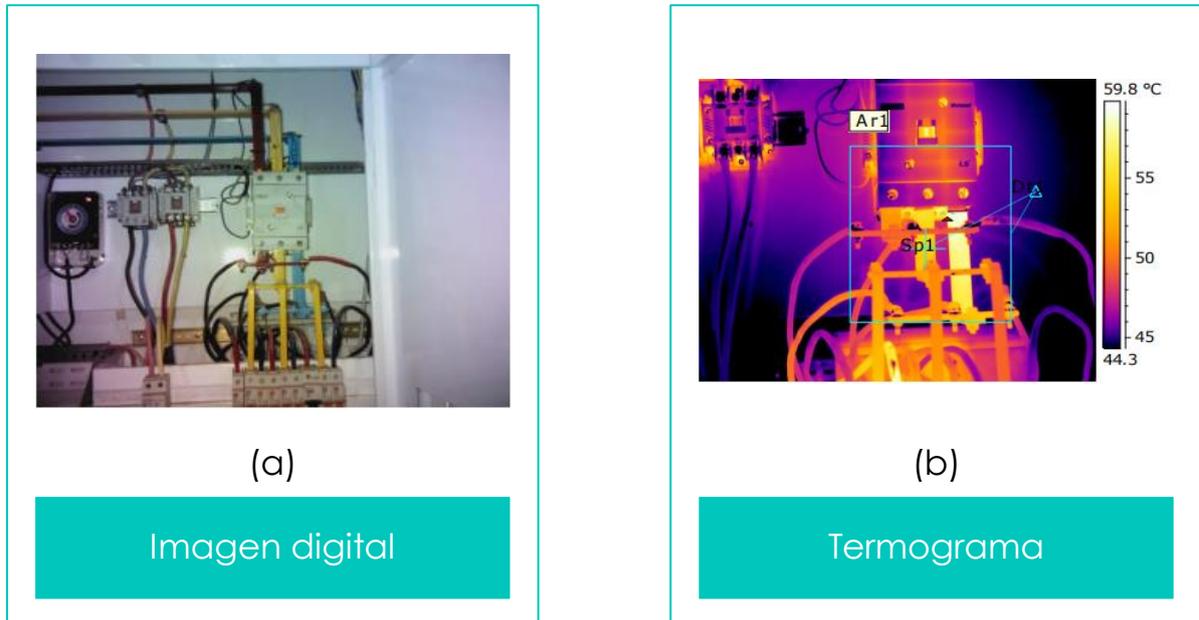


Figura 5.2.4: Imagen digital e infrarroja de un cuadro eléctrico de baja tensión con un defecto de nivel de gravedad “Bajo”. [25]

Tabla 5.2.10: Información sobre la inspección termográfica N°4. [25]

INFORMACIÓN GENERAL		CONDICIONES		MEDIDAS	
<b>Ubicación</b>	Área de distribución	$T_{amb}$	20,5 °C	$T_{máx}$ “Ar1”	136,5 °C
<b>Equipo</b>	AD-01	<b>Humedad relativa</b>	52 %	$T_{máx}$ “Sp1”	58,8 °C
<b>Nombre del archivo</b>	FLUKE0086.jpg	<b>Emisividad</b>	0,90	$\Delta T$ “Dt1”	54,9 °C
<b>Fecha</b>	18/02/2023	<b>Distancia</b>	0,9 m		
<b>Hora</b>	10:45:02				

Tabla 5.2.11: Nivel de gravedad del del defecto de la inspección termográfica N°4. [25]

NIVEL DE GRAVEDAD	RECOMENDACIÓN	MARCADOR
<b>Bajo</b> ( $\Delta T = 0 - 5 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Ninguna acción necesaria	
<b>Medio</b> ( $\Delta T = 5 - 15 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Realizar seguimiento	
<b>Alto</b> ( $\Delta T = 15 - 35 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Acción correctiva inmediata	
<b>Crítico</b> ( $\Delta T \geq 35 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Acción correctiva urgente	

Tabla 5.2.12: Posibles causas del defecto de la evaluación N°4 y acciones correctivas. [25]

ANÁLISIS	ACCIÓN CORRECTIVA
La imagen térmica anterior revela la presencia de múltiples fallos críticos en los filtros y cables (Ar1), los cuales se encuentran sometidos a altas temperaturas.	Durante la carga máxima, la temperatura de referencia del conductor aislado y la superficie del recinto (Ar1 de la imagen térmica) no debe superar los 50°C.

## 5.3 INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA DE INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

### 5.3.1 INTRODUCCIÓN

#### 5.3.1.1 OBJETIVO

En este apartado, se introducirán los informes termográficos proporcionados por “IMPIC-Termografía” termográficos en los años 2009 y 2010, los cuales han sido fundamentales para el desarrollo de este TFG en el campo de la ingeniería mecánica. Estos informes se centran en la “IMPIC-Termografía” termográficos, reconocida en el sector por su experiencia en instalaciones eléctricas y energías renovables, proporcionó informes termográficos detallados sobre problemas identificados en paneles solares fotovoltaicos durante los años 2009 y 2010. Estos informes son de gran relevancia, ya que ofrecen una visión clara de los desafíos asociados con los paneles solares y su mantenimiento, y sirven como referencia valiosa para la evaluación de estrategias de mantenimiento predictivo y optimización del rendimiento de los sistemas de energía solar.

El objetivo principal de este apartado es explorar la utilidad de la termografía infrarroja en la detección de problemas en paneles solares fotovoltaicos y en la implementación de estrategias efectivas de mantenimiento. A través del análisis de los informes termográficos proporcionados por “IMPIC-Termografía”, se busca comprender los patrones de temperatura anormales identificados en los paneles solares y su relación con posibles fallos o mal funcionamiento. Estos informes constituyen una base sólida para el estudio y análisis de la termografía infrarroja aplicada a las instalaciones fotovoltaicas, y contribuyen significativamente a la investigación en el campo de la ingeniería mecánica y energías renovables.

#### 5.3.1.2 CONTEXTO E IMPORTANCIA DE LA INSPECCIÓN TERMOGRAFICA EN PANELES SOLARES

La creciente demanda de energía sostenible y la transición hacia fuentes renovables han llevado a un aumento significativo en la adopción de sistemas fotovoltaicos en todo el mundo. Los paneles solares se utilizan ampliamente en diversos sectores, desde instalaciones residenciales hasta grandes plantas de energía, como una solución eficiente para generar electricidad a partir de la luz solar. Sin embargo,

como cualquier sistema tecnológico, los paneles solares están sujetos a posibles fallos y desgastes a lo largo del tiempo.

La inspección termográfica se ha convertido en una herramienta indispensable para garantizar el funcionamiento adecuado y prolongado de las instalaciones fotovoltaicas. A medida que los paneles solares están expuestos a condiciones climáticas cambiantes, estrés mecánico y otros factores ambientales, pueden surgir problemas como desgaste de materiales, fisuras en las células solares, mala conexión de cables y acumulación de suciedad o escombros en la superficie.

Detectar y resolver estos problemas a tiempo es crucial para asegurar la máxima eficiencia de los paneles solares y maximizar la producción de energía. Un panel solar con puntos calientes o daños en las células puede generar una pérdida significativa de energía y afectar negativamente la rentabilidad y la sostenibilidad de toda la instalación. Además, el mal funcionamiento de los paneles solares puede llevar a costosas reparaciones y reemplazos prematuros.

La inspección termográfica ofrece una ventaja clave sobre otras técnicas de mantenimiento, ya que permite identificar y localizar problemas sin la necesidad de desmontar o interrumpir la operación del sistema. Esto significa que la inspección puede realizarse de manera regular y periódica, sin afectar la producción de energía del sistema. Además, la termografía infrarroja proporciona una visión precisa y detallada de la temperatura en cada panel, permitiendo una evaluación exhaustiva y eficiente de su estado.

## 5.3.2 METODOLOGÍA DE LA INSPECCIÓN

### 5.3.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA ADECUADA

Para realizar inspecciones de paneles solares con cámaras termográficas, se recomienda utilizar una cámara termográfica con las siguientes características:

- **Rango espectral adecuado:** Las cámaras termográficas utilizadas para inspecciones de paneles solares deben tener un detector microbolómetro que cubra la banda espectral de 8 a 14  $\mu\text{m}$ . Esto permite capturar la radiación infrarroja emitida por los paneles solares.
- **Sensibilidad térmica:** Es importante que la cámara termográfica cuente con una sensibilidad térmica de menos de  $0,08^\circ$ . Esto asegura que se puedan detectar pequeñas diferencias de

temperatura en la superficie de los paneles solares, lo que facilita la identificación de posibles problemas o anomalías.

- **Ajuste manual de intervalo y nivel:** La cámara termográfica debe permitir ajustes manuales de intervalo y nivel. Esto es crucial para visualizar claramente las diferencias de temperatura en la termografía y mejorar el contraste de la imagen.
- **Función DDE (Digital Detail Enhancement):** La función DDE es una característica que optimiza el contraste de la imagen automáticamente en escenas con alto rango dinámico. Esta función evita la necesidad de ajustes manuales y proporciona una termografía de mayor calidad y contraste.

Al elegir una cámara termográfica con estas características, se garantiza la capacidad de realizar inspecciones precisas y efectivas de paneles solares, permitiendo la detección temprana de problemas y la toma de medidas correctivas adecuadas.

### 5.3.3 METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN DE PANELES SOLARES

#### 5.3.3.1 TÉCNICA TERMOGRÁFICA UTILIZADA

Las inspecciones termográficas en paneles solares fotovoltaicos pueden llevarse a cabo de dos maneras: de forma manual con una cámara termográfica o mediante el uso de drones equipados con cámaras termográficas.

En el caso de las inspecciones manuales, un técnico capacitado utiliza una cámara termográfica para realizar una evaluación detallada de los paneles solares. El técnico se acerca a cada panel y captura imágenes termográficas desde una distancia cercana. Esto permite obtener imágenes de alta resolución y precisión, lo que facilita la detección de posibles problemas como puntos calientes, conexiones defectuosas o celdas dañadas. Además, las inspecciones manuales permiten una mayor flexibilidad en el posicionamiento de la cámara, lo que facilita la evaluación de diferentes ángulos y áreas específicas de los paneles solares.

El enfoque manual presenta varias ventajas importantes. En primer lugar, permite una interacción directa y cercana con los paneles solares, lo que brinda al técnico una visión detallada de su estado y condiciones. La posibilidad de acercarse a los paneles facilita la identificación precisa de puntos calientes y la detección de anomalías en las conexiones eléctricas y las celdas solares individuales.

Además, el técnico puede ajustar fácilmente la cámara termográfica para enfocarse en áreas específicas que puedan ser más propensas a problemas.

Por otro lado, las inspecciones termográficas con drones ofrecen una alternativa eficiente y rápida para evaluar grandes extensiones de paneles solares. Los drones equipados con cámaras termográficas vuelan sobre los paneles solares, capturando imágenes térmicas aéreas. Esto permite obtener una vista panorámica y completa de los paneles solares, identificando rápidamente posibles problemas en todo el sistema. Las inspecciones con drones son especialmente beneficiosas en proyectos solares de gran escala, ya que permiten cubrir áreas extensas en un tiempo reducido y generan ortomosaicos visuales y térmicos para un análisis detallado.

El enfoque con drones presenta diversas ventajas, especialmente en términos de eficiencia y cobertura de áreas extensas de paneles solares. Al eliminar la necesidad de que el técnico se desplace físicamente a cada panel, las inspecciones con drones pueden ahorrar tiempo y recursos, lo que resulta especialmente valioso en instalaciones solares de gran tamaño. Además, las imágenes aéreas capturadas por los drones ofrecen una visión global y sistémica de la planta fotovoltaica, lo que facilita la identificación rápida de áreas problemáticas y la toma de decisiones estratégicas para el mantenimiento.

Ambos enfoques tienen ventajas y desventajas. Las inspecciones manuales brindan una mayor precisión y acceso a detalles específicos de los paneles solares, pero pueden requerir más tiempo y esfuerzo en el desplazamiento del técnico. Además, pueden ser más adecuadas para instalaciones de menor escala, donde la cobertura de área no es tan extensa. Por otro lado, las inspecciones con drones son más eficientes en términos de tiempo y cubrimiento de áreas extensas, pero pueden presentar limitaciones en la resolución de las imágenes termográficas y no permiten una inspección detallada de las conexiones y celdas en la parte trasera de los paneles.

La elección entre inspecciones manuales o con drones dependerá del contexto específico de la planta fotovoltaica y los objetivos de la inspección. Para instalaciones de menor tamaño o cuando se requiere una evaluación detallada de componentes individuales, las inspecciones manuales pueden ser más apropiadas. En cambio, para plantas solares de mayor envergadura y para obtener una visión general rápida de su estado, las inspecciones con drones serán una opción más eficiente. En muchos casos, la combinación de ambos enfoques puede proporcionar un enfoque integral para el mantenimiento y la optimización del rendimiento de los paneles solares. La elección del enfoque dependerá de la

accesibilidad, el alcance de la inspección y los recursos disponibles para llevar a cabo una evaluación termográfica efectiva y precisa.

La inspección termográfica realizada en el parque solar fue llevada a cabo de forma manual debido a las pequeñas dimensiones de la instalación. Dado que el parque solar tenía un tamaño reducido y una cantidad limitada de paneles solares, se determinó que la inspección manual sería la opción más adecuada para obtener una evaluación detallada y precisa de cada componente.

El enfoque manual permitió al técnico capacitado acercarse a cada panel solar y capturar imágenes termográficas desde una distancia cercana, lo que facilitó la identificación precisa de posibles problemas y anomalías. Además, la inspección manual garantizó una mayor interacción directa con los paneles solares, lo que brindó una visión detallada de su estado y condiciones.

Dadas las características específicas del parque solar, la inspección manual resultó ser la alternativa más eficiente y efectiva para evaluar la integridad de los paneles y garantizar un óptimo rendimiento del sistema. Con esta metodología, se logró obtener información detallada sobre la salud de los paneles solares y se identificaron posibles mejoras para el mantenimiento y la optimización del parque solar.

### 5.3.3.2 EQUIPO UTILIZADO

Para llevar a cabo la inspección termográfica en el parque solar, se utilizó una cámara termográfica de alta calidad de la marca FLUKE. La elección de una cámara FLUKE fue fundamental debido a su reconocida reputación en la industria por ofrecer equipos de alta precisión y confiabilidad.

El modelo seleccionado para esta inspección fue la cámara termográfica FLUKE Ti450 Pro. Esta cámara ofrece una combinación de características avanzadas que la hacen ideal para aplicaciones de termografía en paneles solares. Con una resolución de infrarrojos de 640x480 píxeles, la FLUKE Ti450 Pro proporciona imágenes claras y detalladas, lo que permite una evaluación precisa de la temperatura y posibles problemas en los paneles solares.

La cámara está equipada con un detector de infrarrojos no refrigerado con una sensibilidad térmica de 0.05°C, lo que permite detectar incluso las diferencias de temperatura más sutiles. Esta alta sensibilidad es esencial para capturar con precisión las variaciones de temperatura en los paneles solares, lo que facilita la detección de problemas en etapas tempranas y la implementación de medidas preventivas.

Durante la inspección, se llevaron a cabo mediciones de radiación solar para asegurar la precisión y fiabilidad de las imágenes termográficas. Se utilizaron sensores de radiación solar calibrados y se

tuvieron en cuenta las condiciones climáticas para garantizar que la radiación solar fuera adecuada para el análisis termográfico.

Además de la cámara termográfica FLUKE Ti450 Pro, se utilizaron otros dispositivos de medición, como termómetros infrarrojos y termopares, para verificar y corroborar los datos obtenidos mediante la termografía. La integración de múltiples dispositivos de medición permitió una validación cruzada de los resultados y garantizó una mayor precisión en la evaluación de los paneles solares.

### 5.3.3.3 PARAMETROS Y CONDICIONES DE LA INSPECCIÓN

Para realizar una inspección efectiva de paneles solares con cámaras termográficas, es importante seguir los siguientes procedimientos:

- **Condiciones de irradiancia solar:** Se requiere una irradiancia solar de al menos  $500 \text{ W/m}^2$ , preferiblemente  $700 \text{ W/m}^2$ , para obtener un contraste térmico adecuado durante la inspección. La irradiancia solar se refiere a la potencia instantánea que incide en la superficie y se puede medir utilizando un piranómetro o un pirheliómetro. Las temperaturas exteriores bajas pueden aumentar el contraste térmico y mejorar los resultados.
- **Preparación previa:** Antes de la inspección, es importante limpiar los paneles solares para eliminar cualquier suciedad u obstrucción que pueda afectar la precisión de las imágenes termográficas. Además, es recomendable realizar la inspección en un día despejado y sin nubes para obtener resultados óptimos.
- **Ángulo de incidencia:** La posición y el ángulo de incidencia de la cámara termográfica son cruciales. Se debe colocar la cámara en un ángulo perpendicular a la superficie de los paneles solares para evitar distorsiones en las imágenes y obtener mediciones precisas.
- **Análisis de imágenes:** Durante la inspección, se deben tomar imágenes termográficas de cada panel solar y analizar cuidadosamente las anomalías térmicas. Las áreas problemáticas se destacarán como puntos calientes o fríos en comparación con las áreas circundantes. Es importante documentar y registrar todas las anomalías detectadas.
- **Interpretación de resultados:** Una vez completada la inspección, es fundamental interpretar correctamente los resultados obtenidos. Se deben identificar las posibles causas de las anomalías térmicas, como celdas solares defectuosas, conexiones sueltas o problemas en el

cableado. Esto permitirá tomar las medidas correctivas necesarias para mantener el rendimiento y la eficiencia de los paneles solares.

### **5.3.4 PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN**

#### **5.3.4.1 UBICACIÓN Y DISPOSICIÓN DE LOS PANELES**

La inspección termográfica se llevó a cabo en un parque solar ubicado en la región de Cantabria en España. El parque solar se extiende sobre una superficie de 700 m<sup>2</sup> y alberga un número bajo de paneles solares fotovoltaicos dispuestos en un sistema de matriz.

Los paneles solares están dispuestos en filas y columnas, formando un arreglo fotovoltaico organizado y uniforme. La disposición de los paneles sigue una orientación óptima para capturar la máxima cantidad de luz solar durante el día, maximizando así la generación de energía. El diseño de la matriz de paneles solares ha sido planificado de manera eficiente para lograr una óptima eficiencia en la conversión de la energía solar en electricidad.

El parque solar está dividido en secciones o bloques, cada uno compuesto por varias filas de paneles solares. Estas secciones están interconectadas mediante sistemas de cables y conexiones eléctricas, que canalizan la energía generada hacia un punto central de recolección y distribución.

La ubicación geográfica del parque solar ha sido estratégicamente seleccionada para aprovechar al máximo la disponibilidad de luz solar en la región. Se encuentra en una zona con altos índices de irradiación solar, lo que lo convierte en un lugar ideal para la generación de energía solar.

Durante la inspección termográfica, se evaluaron diferentes áreas del parque solar, enfocándose en las secciones con mayor concentración de paneles solares y en áreas que podrían ser más propensas a problemas potenciales, como las filas cercanas a árboles o estructuras que podrían generar sombras.

La disposición uniforme de los paneles solares facilitó la inspección, ya que permitió una evaluación sistemática y exhaustiva de cada panel. El técnico encargado de la inspección pudo acceder fácilmente a todas las áreas del parque solar para capturar las imágenes termográficas de manera manual, asegurando así una cobertura completa de los paneles solares.

Además de los paneles solares, la inspección también incluyó una evaluación de los sistemas de montaje y soporte utilizados para fijar los paneles en su posición. Se verificaron las conexiones y la integridad estructural de los soportes para asegurar la estabilidad y la durabilidad a lo largo del tiempo.

La información sobre la ubicación y disposición de los paneles solares inspeccionados fue registrada y documentada detalladamente en el informe final. Las imágenes termográficas capturadas durante la inspección se organizaron de manera coherente, lo que permitió identificar y comparar las lecturas de temperatura de diferentes áreas del parque solar.

### 5.3.4.2 DESCRIPCIÓN DE LA INSPECCIÓN PASO A PASO

La inspección termográfica de los paneles solares se llevó a cabo siguiendo un enfoque paso a paso que garantizó una evaluación exhaustiva y precisa. A continuación, se describen detalladamente las etapas de la inspección:

- 1. Preparación y planificación:** Antes de la inspección, se realizó una planificación cuidadosa para asegurar que todas las condiciones fueran óptimas. Se tomó en cuenta la posición del sol y las condiciones climáticas, eligiendo un día claro con una radiación solar adecuada para obtener resultados precisos.
- 2. Asignación de equipos y roles:** Se designó un equipo especializado en inspección termográfica de paneles solares, encabezado por un técnico certificado en termografía. Los miembros del equipo se asignaron a tareas específicas, como la captura de imágenes, registro de datos y análisis en tiempo real.
- 3. Preparación del equipo de inspección:** Se verificó el correcto funcionamiento de la cámara termográfica FLUKE y se realizó su calibración para garantizar mediciones precisas de temperatura. Además, se aseguró que el equipo tuviera suficiente carga de batería y espacio de almacenamiento para las imágenes.
- 4. Identificación y etiquetado de paneles:** Se identificaron los paneles solares en el parque mediante números de serie o identificadores únicos. Cada panel fue etiquetado para facilitar la correspondencia entre las imágenes termográficas y su ubicación física en el parque solar.
- 5. Captura de imágenes termográficas:** El equipo técnico se desplazó por el parque solar de manera sistemática, apuntando la cámara termográfica hacia cada panel identificado. Se

capturaron imágenes de alta resolución, asegurando que cada panel fuera fotografiado desde una distancia adecuada para obtener lecturas precisas.

6. **Registro de datos:** Junto con cada imagen termográfica, se registraron datos adicionales relevantes, como la ubicación GPS del panel, la fecha y hora de captura, y observaciones sobre el estado aparente del panel.
7. **Análisis en tiempo real:** Durante la captura de imágenes, se llevó a cabo un análisis en tiempo real para detectar posibles puntos calientes o áreas con temperaturas anormales. Esto permitió que el equipo técnico pudiera enfocar su atención en paneles específicos que requerían una evaluación más detallada.
8. **Inspección de conexiones y sistemas de montaje:** Además de los paneles solares, se evaluaron las conexiones eléctricas y los sistemas de montaje para detectar problemas potenciales. Se prestó especial atención a las conexiones sueltas o dañadas, ya que pueden afectar significativamente la eficiencia y el rendimiento del sistema.
9. **Análisis post-inspección:** Una vez finalizada la inspección en campo, se descargaron las imágenes termográficas y los datos registrados en una computadora para su posterior análisis y procesamiento.
10. **Generación de informes:** Se elaboró un informe completo que incluyó un resumen de la inspección, detalles sobre el estado de cada panel, análisis de las conexiones y sistemas de montaje, y recomendaciones para el mantenimiento y las acciones correctivas necesarias. El informe se entregó al cliente para su revisión y consideración.

#### 5.3.4.3 COLOCACIÓN DE LA CÁMARA

Las mediciones térmicas en las superficies de vidrio de los paneles solares presentan desafíos debido a las reflexiones especulares. Estas reflexiones pueden hacer que los objetos circundantes con diferentes temperaturas se reflejen en el vidrio, lo que puede resultar en una interpretación incorrecta de los datos y posibles errores de medición.

Para mitigar este problema, es recomendable tomar ciertas precauciones durante las inspecciones termográficas de paneles solares. Algunas de las medidas que se pueden tomar incluyen:

- **Eliminar reflejos y sombras:** Se deben evitar las condiciones de iluminación intensa o la presencia de sombras en la superficie del panel solar durante la inspección. Esto puede lograrse realizando las inspecciones en momentos adecuados del día cuando la iluminación sea más uniforme.
- **Utilizar ángulos de visión adecuados:** Al inspeccionar los paneles solares desde diferentes ángulos, se pueden reducir los efectos de las reflexiones especulares en el vidrio. Esto implica ajustar la posición de la cámara termográfica para minimizar la aparición de objetos reflejados en la imagen.
- **Utilizar técnicas de posprocesamiento:** Después de capturar las imágenes termográficas, se pueden aplicar técnicas de procesamiento de imagen para eliminar o reducir las reflexiones especulares. Estas técnicas pueden ayudar a mejorar la calidad de la imagen y facilitar una interpretación más precisa de los datos.

Al seguir estas precauciones y utilizar técnicas adecuadas de adquisición y procesamiento de imágenes, se puede minimizar el impacto de las reflexiones especulares en las mediciones térmicas de los paneles solares y obtener resultados más precisos y confiables.

La colocación de la cámara termográfica en un ángulo no perpendicular a la placa solar puede ayudar a reducir las reflexiones en el vidrio. Al colocar la cámara en un ángulo, se puede evitar que la luz solar se refleje directamente en la lente de la cámara y en el operario, lo que puede interferir en la captura de imágenes termográficas claras y precisas.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que la emisividad de la superficie del vidrio puede variar dependiendo del ángulo de visión de la cámara termográfica. En general, la emisividad es más alta cuando la cámara se encuentra en una posición perpendicular a la superficie, y tiende a disminuir a medida que el ángulo aumenta.

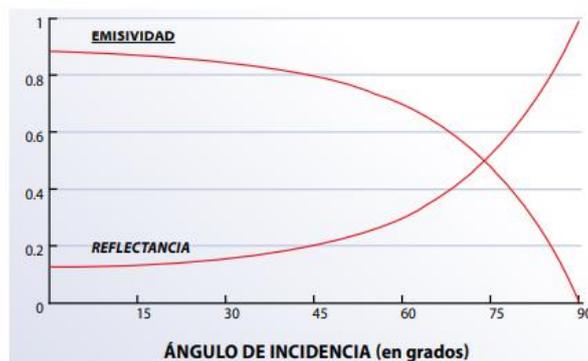


Figura 5.3.1: Dependencia de ángulo de la emisividad del vidrio. [17]

Para lograr una inspección óptima de los paneles solares, se recomienda un ángulo de visión de aproximadamente 5° a 60°, considerando que 0° representa una posición perpendicular. Este rango de ángulos permite minimizar las reflexiones y obtener mediciones térmicas más precisas y consistentes en la superficie de los paneles solares.

Además, es importante tener en cuenta las especificaciones y recomendaciones del fabricante de la cámara termográfica utilizada, ya que algunas cámaras pueden tener características y ajustes específicos para compensar los efectos de los ángulos de visión en las mediciones térmicas.



Figura 5.3.2: Ángulo de visión recomendado (verde) ya a evitar (rojo) al realizar inspecciones termográficas. [17]

#### 5.3.4.4 OBSERVACIONES A GRANDES DISTANCIAS

Lograr un ángulo de visión apropiado durante la preparación de la medición puede ser desafiante en ciertos casos. En la mayoría de los escenarios, el uso de un trípode es una solución conveniente que permite estabilizar la cámara termográfica y ajustar su posición para obtener el ángulo deseado.

Sin embargo, en situaciones más difíciles o en áreas de difícil acceso, pueden ser necesarias plataformas de trabajo móviles o incluso inspecciones aéreas mediante helicópteros. Estas opciones

permiten obtener una mayor distancia del objetivo, lo que facilita el análisis de una zona más amplia en una sola pasada.

Para garantizar la calidad de las imágenes termográficas, es recomendable utilizar una cámara con una resolución de imagen de al menos 320 x 240 píxeles. Para distancias más grandes o aplicaciones más exigentes, se prefiere una resolución de 640 x 480 píxeles. Una mayor resolución proporciona detalles más finos y una imagen más clara, lo que facilita la detección y el análisis de posibles fallas en los paneles solares.

Además, es importante que la cámara termográfica tenga una lente intercambiable para permitir al operador cambiar a un teleobjetivo en inspecciones a larga distancia, como las realizadas desde un helicóptero. Sin embargo, es esencial que la cámara tenga una alta resolución de imagen para que los pequeños detalles térmicos que indican fallas en los paneles solares sean claramente visibles en las mediciones a larga distancia con el teleobjetivo.

#### **5.3.4.5 OBSERVACIONES DESDE UNA PERSPECTIVA DIFERENTE**

En la mayoría de los casos es posible realizar la inspección de placas fotovoltaicas desde la parte trasera utilizando una cámara termográfica. Esta opción presenta ventajas significativas, ya que permite minimizar las interferencias causadas por las reflexiones del sol y las nubes.

Al inspeccionar las placas desde la parte trasera, se obtienen mediciones directas de las células solares sin tener en cuenta la superficie de vidrio que las cubre. Esto puede resultar en temperaturas más altas registradas en la parte trasera de las células.

Además de reducir las interferencias, la inspección desde la parte trasera también puede proporcionar una imagen más clara y precisa de las posibles anomalías térmicas presentes en las células solares. Al medir directamente las células, se pueden detectar de manera más precisa y confiable los puntos calientes, fallas o desgastes que podrían afectar el rendimiento y la eficiencia de los paneles solares.

#### **5.3.4.6 ERRORES DE MEDICIÓN**

Es importante tener en cuenta los posibles errores de medición al realizar inspecciones termográficas en paneles solares. Estos errores pueden surgir debido a una mala colocación de la cámara y a condiciones de medición y ambientales que no son óptimas. Algunos errores de medición comunes incluyen:

- **Ángulo de visión poco profundo:** Si el ángulo de visión de la cámara termográfica no abarca adecuadamente el panel solar, se pueden perder detalles importantes de la superficie. Es importante colocar la cámara en una posición que permita una vista amplia y completa del panel para obtener mediciones precisas.
- **Cambios en la irradiancia solar:** A lo largo del día, la irradiancia solar puede variar debido a cambios en las condiciones atmosféricas, como la presencia de nubes. Estos cambios pueden afectar la temperatura de los paneles solares y, por lo tanto, pueden influir en las mediciones termográficas. Es importante realizar las mediciones en momentos donde la irradiancia solar sea estable y representativa de las condiciones normales de funcionamiento.
- **Reflexiones:** Las reflexiones del sol, las nubes, los edificios altos u otros objetos cercanos pueden interferir en las mediciones termográficas, generando imágenes engañosas o distorsionadas. Es importante tener en cuenta la presencia de posibles fuentes de reflexión y evitar colocar la cámara en posiciones que puedan captar estas reflexiones no deseadas.
- **Ensombrecimiento parcial:** El ensombrecimiento parcial de los paneles solares, causado por la sombra de edificios u otras estructuras cercanas, puede afectar la distribución del calor en la superficie de los paneles. Esto puede generar áreas con temperaturas más bajas y dar lugar a mediciones inexactas. Se debe tener cuidado al seleccionar la ubicación de la cámara y asegurarse de que no haya obstrucciones que puedan causar ensombrecimiento parcial.

Para minimizar los errores de medición, es recomendable realizar las inspecciones en condiciones óptimas, seleccionando cuidadosamente la ubicación y el ángulo de visión de la cámara, considerando la irradiancia solar estable, evitando reflexiones no deseadas y asegurándose de que no haya ensombrecimiento parcial en los paneles solares. Esto contribuirá a obtener mediciones más precisas y confiables de los paneles solares mediante el uso de la termografía.

## 5.3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.3.5.1 IMPACTO EN RENDIMIENTO Y EFICIENCIA

El rendimiento de un módulo fotovoltaico está influenciado por varios factores, siendo dos de los principales la temperatura de las células fotovoltaicas y la radiación incidente. Estos factores

determinan las condiciones de operación óptimas del panel fotovoltaico, conocidas como "Standard Test Conditions" (STC).

Tabla 5.3.1: Standard Test Conditions (STC). [26]

STANDARD TEST CONDITIONS	
<b>Irradiancia</b>	1000 W/m <sup>2</sup>
<b>Espectro AM</b>	1,5
<b>Temperatura de la célula</b>	25°C

Las STC se definen con una temperatura de células fotovoltaicas de 25°C y una radiación incidente de 1000 W/m<sup>2</sup>. Estas condiciones de referencia se utilizan para comparar y evaluar el rendimiento de los paneles solares en igualdad de condiciones.

Es importante tener en cuenta que, en la realidad, las condiciones de funcionamiento pueden variar significativamente de las STC debido a factores ambientales y de diseño específicos de la instalación fotovoltaica. Por lo tanto, es fundamental considerar estos factores y realizar mediciones y análisis en tiempo real para evaluar el rendimiento real de los módulos fotovoltaicos en condiciones reales de funcionamiento.

Para optimizar el rendimiento de los paneles solares, es crucial controlar la temperatura de las células fotovoltaicas y maximizar la radiación incidente. El sobrecalentamiento de las células puede reducir la eficiencia de conversión de energía, mientras que una radiación incidente baja limitará la generación de electricidad.

En la siguiente sección, se explorarán las aplicaciones de la termografía infrarroja como herramienta para detectar problemas relacionados con la temperatura de las células fotovoltaicas y su impacto en el rendimiento de los módulos solares.

El conocimiento del estado de funcionamiento óptimo de una instalación fotovoltaica es crucial para evaluar su rendimiento. Una variable importante en este sentido es la "Nominal Operation Cell Temperature" (NOCT), que representa la temperatura alcanzada por las células fotovoltaicas en condiciones de trabajo específicas. Sin embargo, simplemente igualar la NOCT a la temperatura ideal

indicada por las "Standard Test Conditions" (STC) no garantiza un funcionamiento óptimo de la instalación fotovoltaica. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo una monitorización y revisión continua de la instalación.

Tabla 5.3.2: Nominal Operation Cell Temperature (NOCT). [26]

NOCT	
<b>Irradiancia</b>	1000 W/m <sup>2</sup>
<b>Espectro AM</b>	1,5
<b>Temperatura ambiente</b>	20 °C
<b>Velocidad del viento</b>	1 m/s

El mantenimiento de las instalaciones fotovoltaicas desempeña un papel esencial para garantizar su rendimiento óptimo. En este sentido, la termografía se utiliza como una herramienta efectiva para detectar posibles defectos causados por el sobrecalentamiento de componentes. La interrelación de estos componentes implica que cualquier variación de temperatura puede afectar negativamente al rendimiento total de la instalación.

El aumento de temperatura en las células fotovoltaicas tiene varios efectos adversos, entre ellos:

- Disminución de potencia: Cada grado centígrado de aumento de la temperatura de trabajo del módulo conlleva una disminución del 0,5% en la potencia generada.
- Aceleración del deterioro del módulo: El sobrecalentamiento acelera el deterioro de los módulos fotovoltaicos, lo que puede reducir su vida útil y su rendimiento a largo plazo.

Se han analizado 3 módulos iguales cuyas características son las de la siguiente tabla:

Tabla 5.3.3: Características de los módulos fotovoltaicos. [26]

CARÁCTERÍSTICAS	
<b>Tipo de instalación</b>	Fija
<b>Irradiancia</b>	987 W/m <sup>2</sup>

<b>Humedad relativa</b>	60 %
<b>Temperatura ambiente</b>	25°C a 35°C
<b>Potencia máxima <math>P_{m\acute{a}x}</math></b>	190
<b>Tensión a máxima potencia <math>(V)_{P_{m\acute{a}x}}</math></b>	26
<b>Intensidad a máxima potencia <math>(I)_{P_{m\acute{a}x}}</math></b>	7,5
<b>Tensión en circuito abierto <math>V_{ca}</math></b>	32
<b>Intensidad en cortocircuito <math>I_{cc}</math></b>	8
<b>Tolerancia</b>	5%
<b>NOCT</b>	44°C

De esos módulos, dos de ellos no tenían ningún defecto detectable mediante termografía y el tercero, tenía una célula defectuosa con un delta  $\Delta T > 40^\circ\text{C}$  con respecto a las células adyacentes (Figura 5.3.3).

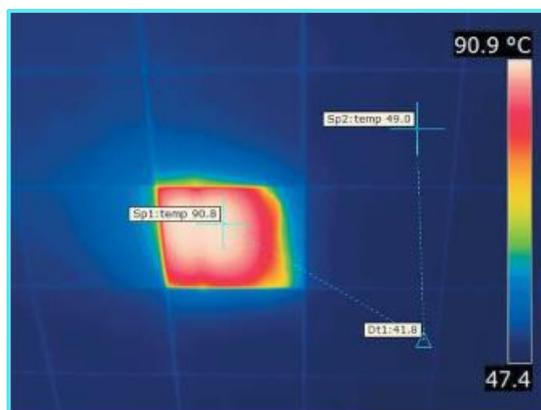


Figura 5.3.3: Célula defectuosa. [26]

Para determinar cómo afecta la célula defectuosa del módulo 390 al rendimiento global, se miden las tensiones de los tres módulos de forma simultánea durante un periodo de tiempo de 30 segundos. Los resultados se muestran en una gráfica por puntos (Figura 5.3.4).

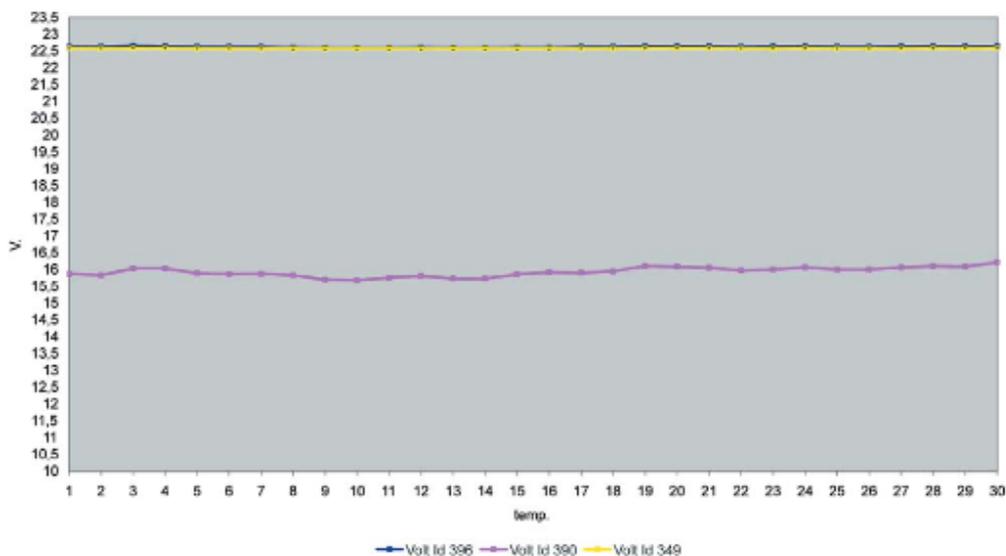


Figura 5.3.4: Tensiones de cada uno de los módulos. [26]

En la tabla se promediarán las tensiones de cada módulo fotovoltaico y se compararán con la tensión teórica ideal que podrían proporcionar en condiciones STC. La tensión resultante, expresada en forma porcentual, indicará el rendimiento de los módulos en relación a las condiciones óptimas.

Tabla 5.3.4: Valores promedio del rendimiento de los 3 módulos fotovoltaicos. [26]

Variable	Tensión promedio	Tensión porcentual respecto a la tensión máxima en condiciones STC
<b>Módulo 349</b>	22,62 V	88,69 %
<b>Módulo 390</b>	15,93 V	62,48 %
<b>Módulo 396</b>	22,56 V	88,48 %

En esta tabla, se registrarán los promedios de las tensiones obtenidas para cada módulo durante el análisis. Estas tensiones se compararán con la tensión teórica ideal que se espera que los módulos proporcionen en condiciones STC. El rendimiento de cada módulo se expresará en forma porcentual, lo que permitirá evaluar su eficiencia en relación con las condiciones óptimas de funcionamiento.

El rendimiento de los módulos es un indicador clave para evaluar su eficiencia y determinar si están operando a su máximo potencial. Un rendimiento cercano al 100% indica que los módulos están

generando la tensión esperada en condiciones óptimas, mientras que un rendimiento menor puede sugerir posibles problemas o deficiencias en el sistema fotovoltaico.

Se puede concluir que, un malfuncionamiento de una sola de las células de un módulo puede provocar una pérdida de rendimiento global de un 24% con respecto al máximo rendimiento real de la instalación (90% aproximadamente).

### 5.3.5.2 DEFECTOS DETECTABLES MEDIANTE TERMOGRAFÍA INFRARROJA

En una termografía de paneles solares, las piezas más calientes se mostrarán claramente, y dependiendo de su forma y ubicación, pueden indicar diferentes tipos de fallos. Aquí hay algunos ejemplos:

- **Problemas de conexiones:** Si toda la placa solar está más caliente de lo habitual, podría indicar problemas con las conexiones eléctricas. Esto podría incluir conexiones flojas, desgastadas o dañadas.
- **Problemas en celdas individuales o hileras de celdas:** Si se observan puntos calientes o un "patrón mosaico" en celdas individuales o hileras de celdas, podría indicar problemas como diodos de derivación defectuosos, cortocircuitos internos o desajustes de las celdas. Estos problemas pueden afectar el rendimiento general del panel solar.
- **Ensombrecimiento y grietas:** El ensombrecimiento, ya sea debido a sombras de objetos cercanos o grietas en las celdas, puede aparecer como puntos calientes o formas poligonales en la termografía. Estos puntos calientes indican un aumento de temperatura en las áreas afectadas, lo que puede sugerir la presencia de celdas defectuosas o ensombrecimiento que reduce la eficiencia del panel.

Es importante tener en cuenta que la termografía proporciona una indicación inicial de posibles fallos, pero se requiere una evaluación adicional mediante pruebas eléctricas y una inspección visual para confirmar y precisar la naturaleza de la avería. Además, comparar las termografías obtenidas en diferentes condiciones, como carga, sin carga o en caso de cortocircuito, y analizar las termografías de la parte delantera y trasera de la placa también puede proporcionar información valiosa sobre la salud y el rendimiento de los paneles solares.

Tabla 5.3.5: Ejemplo de defectos típicos detectables en paneles solares fotovoltaicos. [26]

TIPO DE DEFECTO	SE MANIFIESTA COMO	EJEMPLO
<b>Diodo de derivación defectuoso (cortocircuito)</b>	Patrón tipo “mosaico”	Ninguno
<b>Daño</b>	Una parte de la celda tiene mayor temperatura	Grieta
<b>Ensombrecimiento temporal</b>	Puntos calientes	Excrementos de pájaro
		Humedad
		Contaminación
<b>Problemas en las conexiones</b>	Placa o hilera de placas a mayor temperatura	Placa o hilera de placas desconectadas
<b>Defecto de fábrica</b>	Punto caliente, punto frío o superficie alargada sobre las celdas a mayor temperatura	Bolsas de gas
		Impurezas

### 5.3.5.3 EVALUACIÓN DE ANOMALÍAS Y AREAS PROBLEMATICAS

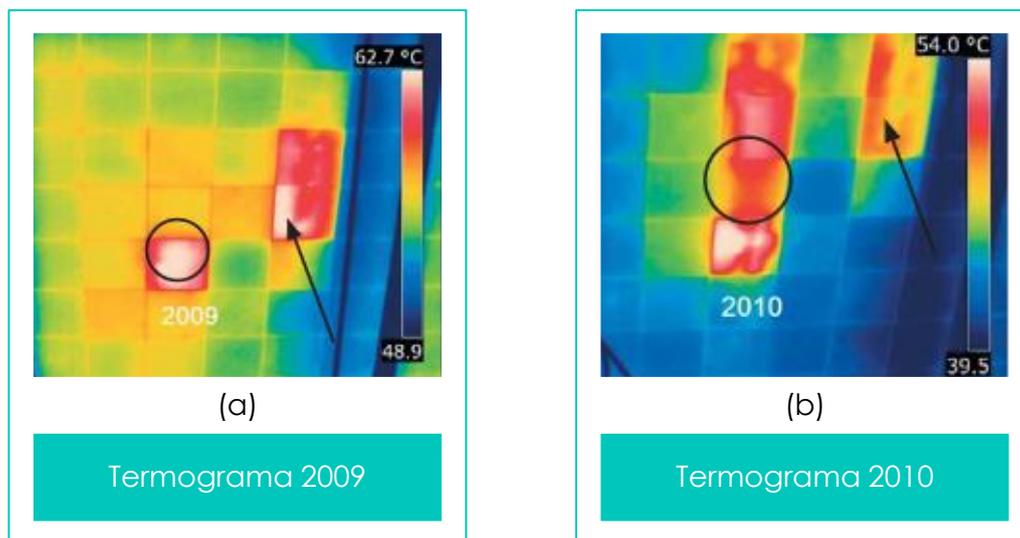


Figura 5.3.5: Termogramas del mismo módulo fotovoltaico tomadas en los años 2009 (a) y 2010 (b). Se aprecia un defecto de tipo “sombra”. [26]

Lo que realmente permitirá llevar a cabo una inspección termográfica exhaustiva de toda la instalación fotovoltaica es la creación de un historial y la comparación de la evolución de los defectos encontrados en cada inspección. En el mismo emplazamiento, años antes de las inspecciones citadas previamente, se analizaron los defectos y su progresión a lo largo de un año de un panel que se conocía operaba en condiciones anormales. En la [Figura 5.3.5](#) se señalan con un círculo y una flecha las células que presentaban mayores temperaturas en el termograma de 2009. En el termograma de 2010, estas mismas células ya no son las que presentan los mayores defectos, aunque sí se ha incrementado la cantidad de células afectadas. Lo más probable es que se trate de un defecto de carácter transitorio, denominado defecto de tipo “sombra”.

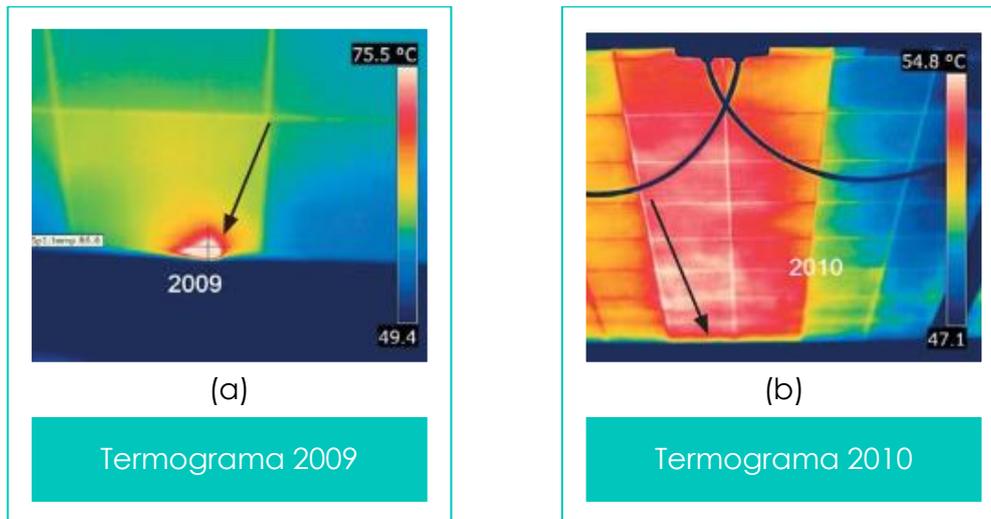


Figura 5.3.6: Termogramas del mismo módulo fotovoltaico tomadas en los años 2009 (a) y 2010 (b). Se aprecia un defecto de “soldadura”. [26]

En la Figura 5.3.6 se observa la evolución del deterioro de un módulo, el cual inicialmente tan solo presentaba un defecto de soldadura en su parte inferior, tal y como se indica mediante una flecha. Es evidente que, en la inspección siguiente, el defecto ha evolucionado hasta provocar la desconexión del diodo, resultando en el funcionamiento de únicamente 2/3 de las células del módulo.

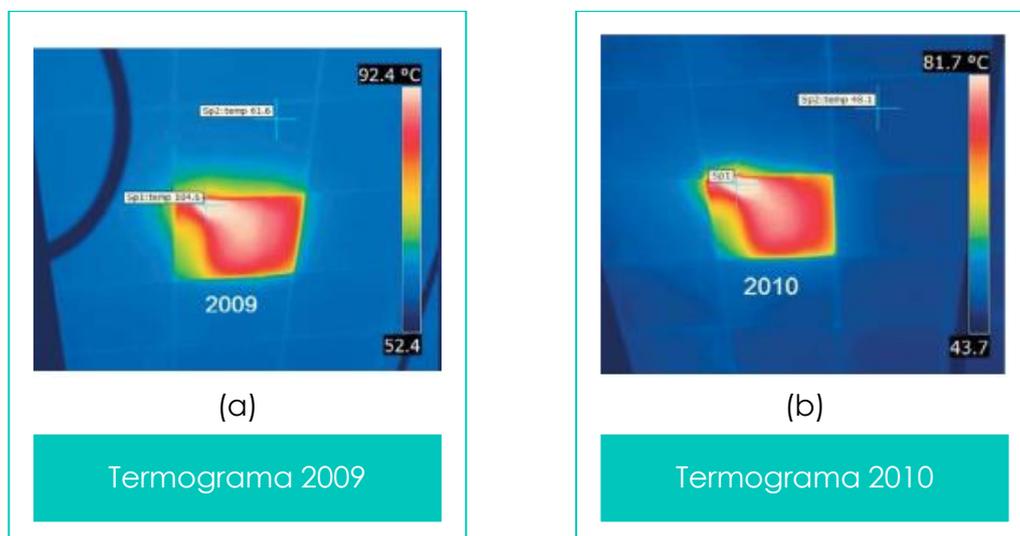


Figura 5.3.7: Termogramas del mismo módulo fotovoltaico tomadas en los años 2009 (a) y 2010 (b). Se aprecia un defecto de tipo “fisura”. [26]

Asimismo, es posible constatar que algunos defectos no presentan cambios significativos, al menos en lapsos temporales no demasiado extensos, como es el caso del defecto tipo fisura mostrado en la [Figura 5.3.7](#).

---

# 6 Aplicaciones potenciales de la termografía

---

## 6.1 APLICACIONES DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA PARA EL ESTUDIO DE FLUIDOS

La termografía infrarroja es una técnica útil para obtener información relevante sobre las propiedades de los fluidos bajo estudio. Esta técnica presenta varias ventajas en comparación con otros métodos no intrusivos. En primer lugar, las mediciones son cuantitativas y se pueden realizar rápidamente. Además, la termografía infrarroja puede aplicarse en entornos donde otros métodos de medición no son prácticos, viables o factibles. El objetivo de este apartado es triple:

- Ilustrar cómo puede aplicarse la termografía infrarroja para estudiar el comportamiento de los fluidos empleados.
- Mostrar ventajas y limitaciones de la técnica.
- Considerar aplicaciones potenciales.

La termografía infrarroja puede utilizarse para estudiar flujos con una extensión situada entre el milímetro y el metro, así como temperaturas que van desde la temperatura ambiente hasta los valores de temperatura máxima de combustión. A partir de las mediciones de la intensidad de radiación infrarroja se pueden obtener datos tanto cuantitativos como cualitativos de las características del flujo.

Los valores escalares y su distribución dentro de los flujos pueden determinarse mediante la aplicación de técnicas inversas y de deconvolución. La deconvolución es un proceso matemático utilizado en el procesamiento de imágenes para mejorar la calidad y la resolución de una imagen borrosa o distorsionada. El objetivo de la deconvolución es recuperar la imagen original a partir de la imagen distorsionada, teniendo en cuenta el modelo de degradación que causó la distorsión. En términos sencillos, se podría decir que la deconvolución consiste en deshacer el efecto del proceso que causó la la distorsión en una imagen. Se basa en la suposición de que la distorsión se puede modelar

matemáticamente como una función conocida o estimable, llamada función de punto de respuesta al impulso (PSF, por sus siglas en inglés). Utilizando la PSF, se realiza una inversión matemática para eliminar o reducir la distorsión y así obtener una imagen más nítida y detallada.

Aunque la termografía infrarroja es más fácil de aplicar, los valores obtenidos tienden a tener una resolución espacial y escalar más baja en comparación con los diagnósticos láser. Esto se debe a la naturaleza de la línea de visión de las mediciones y a la determinación indirecta de los valores escalares. Sin embargo, la naturaleza cuantitativa de la termografía infrarroja permite su aplicación directa en la evaluación de simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés). Además, esta técnica puede ser especialmente valiosa cuando la escala o ubicación de los experimentos limitan el uso de otras técnicas, cuando el entorno presenta altas temperaturas o cuando el fluido experimenta transitorios frecuentes.

Se espera que la termografía infrarroja encuentre cada vez más aplicaciones en el estudio de fluidos, gracias a sus capacidades únicas en comparación con otras técnicas de imagen pasiva.

### 6.1.1 INTRODUCCIÓN

La termografía infrarroja es una técnica prometedora para el estudio cualitativo y cuantitativo de las características de los fluidos. En este estudio, se realizan mediciones de las intensidades de radiación emitidas y absorbidas por los fluidos a lo largo del campo de visión.

La [Figura 6.1.1](#) proporciona ejemplos de imágenes infrarrojas de núcleos de ignición, una llama de hidrógeno laminar inestable, un penacho de escape que no reacciona y una llama de difusión de etileno. Por ejemplo, las mediciones de las emisiones de intensidad de radiación de los núcleos de ignición ([Figura 6.1.1 \(a\)](#)) se han utilizado para determinar la evolución de estos núcleos; de forma similar, las emisiones de la llama de hidrógeno ([Figura 6.1.1 \(b\)](#)) se han utilizado para determinar la distribución del vapor de agua dentro del flujo.

Las imágenes mostradas en la [Figura 6.1.1](#) permiten apreciar cómo los flujos que reaccionan (la columna de la derecha) y los que no reaccionan (columna de la izquierda) pueden estudiarse utilizando la termografía infrarroja. Nótese que las concentraciones de especies radiantes evaluadas mediante termografía infrarroja pueden variar desde valores atmosféricos ([Figura 6.1.1 \(a\)](#)) hasta valores propios de la combustión (resto de paneles en la [Figura 6.1.1](#)).

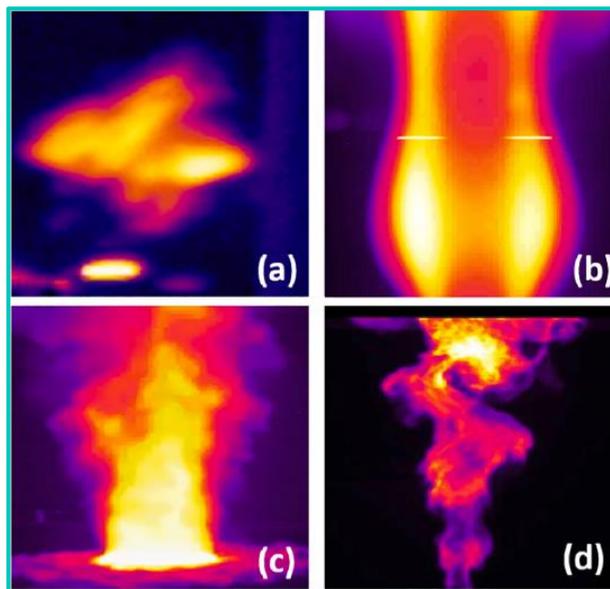


Figura 6.1.1: Imágenes infrarrojas de (a) núcleo de ignición, (b) llama de hidrogeno inestable, (c) penacho de escape subsónico y (d) llama de difusión de etileno. [27]

Históricamente, la termografía infrarroja se ha utilizado principalmente para medir la distribución de temperaturas en la superficie de objetos sólidos. Sin embargo, con la disponibilidad de cámaras infrarrojas sensibles al rango medio, la comunidad científica ha ampliado su aplicación al estudio de fluidos.

La naturaleza cuantitativa de la termografía infrarroja, junto con la capacidad de visualizar gases especiales como el agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y metano ( $CH_4$ ), a convierte en una técnica ventajosa en comparación con otras técnicas de imagen pasiva. Al ser mediciones cuantitativas, se pueden comparar directamente las intensidades de radiación entre diferentes flujos, determinar valores escalares y calcular intensidades de radiación para evaluar simulaciones. Sin embargo, una limitación inherente de la termografía infrarroja es que las mediciones se realizan en relación con las intensidades promedio a lo largo de la trayectoria, lo que restringe el análisis al campo de visión, a menos que se aplique una técnica de deconvolución.

En algunas aplicaciones, la termografía infrarroja puede ser más adecuada que las técnicas basadas en láser. Por ejemplo, mientras que las técnicas láser pueden usarse para determinar las temperaturas de núcleos de ignición, el movimiento de estos núcleos fuera del plano dificultaría la correlación de las temperaturas con su ubicación espacial. Además, para estudiar penachos de gran tamaño, como se

muestra en la [Figura 6.1.1 \(c\)](#), las técnicas láser requerirían múltiples haces láser, mientras que una cámara termográfica permitiría estudiar regiones más grandes del penacho de una vez.

Al estudiar flujos, también se deben considerar factores como:

- El tiempo,
- Los recursos necesarios para implementar la técnica de medición
- La ubicación para la medición.

En general, la instrumentación para la termografía infrarroja se puede instalar en unas pocas horas y desplegarse en cualquier entorno donde se pueda utilizar una cámara convencional. Sin embargo, el análisis de las mediciones de intensidad de radiación puede llevar más tiempo que la adquisición de los datos, dependiendo de la naturaleza cualitativa o cuantitativa del análisis.

Se espera que este artículo ayude a los lectores a comprender mejor cuándo la termografía infrarroja puede ser útil en investigación e ingeniería y poner de manifiesto sus posibles dificultades y limitaciones.

A continuación, se explica la aplicación de la termografía infrarroja a:

- Identificar las características del flujo
- Proporcionar datos para evaluar las simulaciones
- Evaluar los flujos dentro de dispositivos prácticos.

La técnica de termografía infrarroja se contrastará con otras técnicas de medición para ilustrar sus limitaciones y ventajas. El artículo concluirá discutiendo las posibles aplicaciones futuras de la termografía infrarroja en el estudio de los fluidos en cuestión.

## **6.1.2 MEDICIONES EN LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA**

La radiación infrarroja emitida o transmitida a través de un fluido depende de la longitud de la trayectoria, y de la magnitud y distribución de los valores escalares. Los gases medibles en el infrarrojo medio son el CO<sub>2</sub>, el CO, hollín, el NO, hidrocarburos inquemados y H<sub>2</sub>O, entre otros. Las moléculas presentes en la atmósfera pueden tener concentraciones que generan una emisividad o absorción de radiación lo suficientemente alta como para ser detectadas mediante termografía infrarroja. La emisión y absorción de radiación en el infrarrojo son el resultado de transiciones en los estados cuánticos,

rotacionales y de vibración de las moléculas. Sin embargo, los gases diatómicos como el O<sub>2</sub> y el N<sub>2</sub> la absorción o emisión de radiación infrarroja.

La transferencia de calor por radiación suele medirse como un flujo  $q''$  [W/m<sup>2</sup>], o como intensidad de la radiación  $I$  [W/m<sup>2</sup>-sr]. Las magnitudes espectrales pueden medirse como  $q_\lambda''$  [W/m<sup>2</sup>-μm], o  $I_\lambda$  [W/m<sup>2</sup>-sr-μm]. La intensidad de la radiación considera la dependencia direccional de la radiación emisora o incidente. La variación de la intensidad que atraviesa un medio se describe mediante la forma diferencial de la ecuación de transferencia de radiación (ETR):

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = \kappa_\lambda I_{b\lambda} - \kappa_\lambda I_\lambda \tag{6.1}$$

En esta ecuación, una suposición razonable para flujos con pocas partículas es despreciar la dispersión de la radiación. Para algunos flujos, como los que contienen hollín, puede ser necesario añadir una componente de dispersión en la ETR para aumentar la exactitud, dependiendo del tamaño de las partículas y de las longitudes de onda de interés. El primer término del lado derecho de la ecuación (6.1) corresponde a la radiación emitida a lo largo de la trayectoria mientras que el segundo término corresponde a la radiación incidente absorbida.  $I_{b\lambda}$  es la radiación emitida por una fuente de cuerpo negro y está descrita por la distribución de Planck:

$$I_{b\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]} \tag{6.2}$$

La ecuación de transferencia radiación para un medio en el que no hay dispersión se puede reescribir en forma integral:

$$I_\lambda = I_\lambda(0)e^{-\tau_\lambda} + \int_0^{\tau_\lambda} I_{b\lambda}(\tau_\lambda^*) e^{-(\tau_\lambda - \tau_\lambda^*)} d\tau_\lambda^* \tag{6.3}$$

La ecuación se puede emplear de dos formas en función del tipo de termografía:

- **Termografía infrarroja basada en la absorción:**

1. Se determina  $I_\lambda(0)$ .
2. Se mide  $I_\lambda$ .

3. Se usa  $I_\lambda$  para determinar la emisión y la absorción a lo largo de la trayectoria.

- **Termografía basada en la emisión:**

1. Se mide  $I_\lambda(0)$
2. Se resta de  $I_\lambda$  para determinar las emisiones del flujo.
3. Se desprecia la radiación incidente.

Resolver la ETR permite relacionar las mediciones con la física del flujo y establecer una comparación entre los valores medidos y los calculados.

### 6.1.2.1 DISPOSITIVOS DE MEDIDA Y MÉTRICAS

Las cámaras infrarrojas miden la  $I_\lambda$  del flujo, integrado con relación a la anchura espectral de cualquier filtro y del detector:

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \alpha_\lambda I_\lambda(0) e^{-\tau_\lambda} d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{\tau_\lambda} \alpha_\lambda I_{b\lambda}(\tau_\lambda^*) e^{-(\tau_\lambda - \tau_\lambda^*)} d\tau_\lambda^* d\lambda \quad (6.4)$$

La  $\alpha_\lambda$  considera la respuesta espectral del detector y la absorción a través de la óptica de la cámara y los filtros. Lo que se mide con una cámara es la radiación que llega al detector (no la radiación emitida por el flujo) lo cual hay que tener en cuenta a la hora de realizar comparaciones entre valores medidos y valores calculados. Además, la ecuación (6.4) no considera la emisión de radiación de la óptica y chasis de la propia cámara, cuya contribución a la intensidad de radiación medida es considerada como ruido. La contribución relativa a la intensidad medida de las fuentes emisoras de este ruido disminuye a medida que la temperatura y/o la concentración de los gases aumenta.

La intensidad de la radiación se obtiene mediante mediciones realizadas por una cámara que está configurada con un calibrador similar a un cuerpo negro. El calibrador consiste en una cavidad calentada eléctricamente, con temperatura controlada y emisividad conocida (aproximadamente igual a uno). La correlación entre los conteos de fotones y la intensidad de la radiación suele ser lineal, excepto cerca de los estados de conteo máximo y mínimo detectables por el equipo. La naturaleza cuantitativa de las mediciones permite comparar directamente las intensidades entre diferentes mediciones. Al igual que con otros tipos de calibración, la incertidumbre asociada a la temperatura y emisividad del cuerpo negro se propaga a la incertidumbre de las mediciones de intensidad.

Las cámaras infrarrojas tienen uno de los dos tipos de detectores:

- **Detectores térmicos:** Funcionan midiendo los cambios en la energía sensible a medida que el detector absorbe la radiación. Suelen ser sensibles en el infrarrojo de onda larga ( $\approx 10 \mu\text{m}$ ) y más baratas que las cámaras con detectores cuánticos.
- **Detectores cuánticos:** Funcionan convirtiendo directamente la radiación en una señal eléctrica. Los detectores cuánticos suelen utilizarse para realizar mediciones en el infrarrojo medio (1-5  $\mu\text{m}$ ). La mayoría de las cámaras infrarrojas utilizadas en estudios científicos de termografía infrarroja de gases emplean detectores de este tipo, principalmente porque muchos gases emiten radiación en el infrarrojo medio de manera intensa. Los píxeles adyacentes en el detector pueden responder de forma ligeramente diferente a la radiación incidente debido a la falta de uniformidad en las propiedades de los materiales y las características del detector. Para compensar estas diferencias de respuesta entre los píxeles ante una misma fuente de radiación, se aplica un "factor de corrección de no uniformidad" (NUC). Este factor se obtiene al realizar mediciones de una fuente con temperatura y emisividad uniforme, y luego se observan las diferencias en la captación de radiación por parte de cada píxel. La eficiencia de conversión de fotones a señal eléctrica puede variar para diferentes longitudes de onda, y esta respuesta espectral (es decir,  $\alpha_\lambda$  en la ecuación (6.4)) se proporciona por el fabricante y se considera durante el proceso de calibración. Es importante tener precaución al informar las mediciones, teniendo en cuenta la respuesta espectral.

La resolución espectral y el rango de las mediciones de la intensidad de la radiación obtenidas mediante cámaras infrarrojas están limitadas por las características del detector y su óptica. Se utilizan filtros para restringir el rango del espectro infrarrojo captado. Las cámaras infrarrojas miden una intensidad espectral integrada, es decir, un valor numérico de intensidad promediado a lo largo de las zonas del espectro infrarrojo que pueden atravesar el filtro de la cámara. La selección de la longitud de onda central del filtro debe considerar el tipo de gas emisor de radiación. Los filtros con bandas espectrales más estrechas aíslan mejor las emisiones de radiación de los fluidos, siempre y cuando sean adecuados para la especie gaseosa en cuestión (con un ancho espectral medio de los filtros del orden de  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ ). La separación de la radiación emitida por las partículas y las especies gaseosas puede ser muy compleja debido a la amplia banda de emisión del hollín.

Recientemente, se ha comenzado a utilizar imágenes hiperespectrales en la termografía infrarroja para el estudio de los fluidos. Los generadores de imágenes hiperespectrales son cámaras infrarrojas diseñadas para medir la intensidad espectral ( $I_\lambda$ ) en múltiples longitudes de onda ( $\lambda$ ) en dos dimensiones. Estos instrumentos operan de dos formas distintas:

- a) Midiendo las emisiones del espectro completo en una dimensión y realizando un escaneo en la segunda dimensión
- b) Recogiendo mediciones en una longitud de onda concreta en dos dimensiones y realizando un escaneo espectral completo.

Además, los espectrómetros de transformación de Fourier (IFTS) se han utilizado recientemente en investigaciones relacionadas con la emisión de radiación infrarroja en gases. Este sistema proporciona mediciones bidimensionales de la intensidad espectral ( $I_\lambda$ ) al acoplar un interferómetro de Michelson a una cámara infrarroja. El funcionamiento de este sistema es el siguiente:

1. La luz entra en el dispositivo.
2. El haz de luz inicial atraviesa un divisor de haz y se forman dos trayectorias
  - El primer rayo de luz es reflejado en dos superficies de una esquina cúbica móvil (Fixed Corner Cube).
  - El segundo rayo de luz reflejado en dos superficies de una esquina cúbica fija (Movable Corner Cube).
3. Ambos haces de luz se recombinan en un punto, creándose un patrón de interferencia (constructivo o destructivo).
4. El haz de luz recombinado alcanza el conjunto de planos focales (Imaging Optics)
5. Una de las superficies reflectantes, señalada como esquina cubica fija (Fixed Corner Cube) en la [Figura 6.1.2](#), crea dos trayectorias de luz al paso de esta.

Las mediciones resultantes contienen una componente constante ( $I^{DC}$ ) y componentes fluctuantes ( $I^{AC}(x)$ ), donde  $x$  es la diferencia de distancia recorrida por los dos haces de luz. El  $I^{DC}$  es un término que permanece constante si la fuente emisora es constante (por ejemplo, una célula de gas), pero variará para las emisiones fluctuantes (por ejemplo, una llama). El  $I^{AC}(x)$  indica el cambio en la intensidad

de radiación como resultado de las interferencias producidas por la luz. La expresión que proporciona la intensidad medida por el IFTS:

$$I(x) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [1 + \cos(2\pi\tilde{\nu}x)] G(\tilde{\nu}) I(\tilde{\nu}) d\tilde{\nu} = I^{DC} + I^{AC}(x) \quad (6.5)$$

Donde  $\tilde{\nu}$  representa el número de onda [ $\text{cm}^{-1}$ ],  $G(\tilde{\nu})$  es la respuesta espectral general del sistema y  $I(\tilde{\nu})$  es la intensidad que llega al detector. Este último término tiene en cuenta tanto la emisión de la fuente, la atenuación atmosférica y la radiación emitida por el sensor.

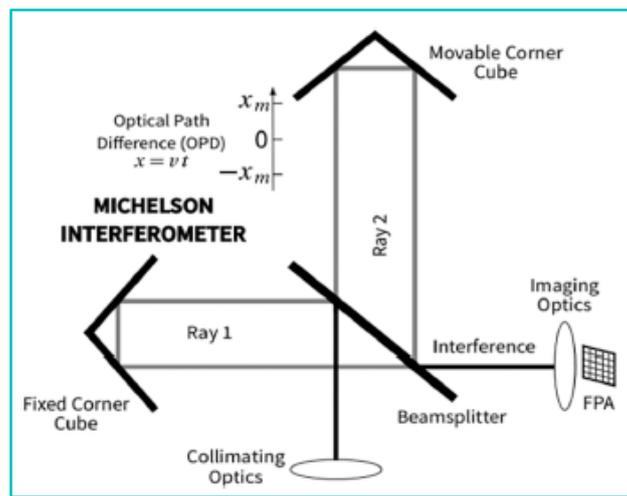


Figura 6.1.2: Fundamentos del funcionamiento del interferómetro de Michelson.

Las emisiones de intensidad espectral se obtienen a partir de las mediciones de  $I(x)$  aplicando una transformación de Fourier a  $I(x)$ . La Figura 6.1.3 muestra ejemplos de los espectros resultantes en tres ubicaciones de una llama de quemador Hencken. La resolución espacial de las mediciones, que se considera de alta resolución para el IFTS, es de  $0,75 \text{ cm}^{-1}$ . Es importante reconocer que los espectros mostrados en la Figura 6.1.3 corresponden solo a tres píxeles (es decir, diferentes ubicaciones de la llama). En el ejemplo destacado aquí, había  $256 \times 128$  píxeles con información espectral similar a la que se muestra en la Figura 6.1.3. Por lo tanto, el análisis de datos de emisión espectral se puede aplicar en dos dimensiones.

Los espectros mostrados en la Figura 6.1.3 proporcionan información sobre la presencia de diversos productos de combustión. Por ejemplo, las emisiones evidentes cerca de  $2250 \text{ cm}^{-1}$  provienen principalmente del modo de estiramiento del  $\text{CO}_2$ . Se observa emisión del P-branch de CO entre  $2000$  y  $2150 \text{ cm}^{-1}$ . Entre  $3000$  y  $4200 \text{ cm}^{-1}$ , las emisiones provienen principalmente del vapor de  $\text{H}_2\text{O}$  y en

menor medida de CO<sub>2</sub> y OH. Es importante destacar que la magnitud relativa del desplazamiento de intensidad depende de la altura dentro de la llama. Los cambios en la intensidad resultan de diferencias en las concentraciones de las especies radiantes, temperaturas y longitudes de trayectoria.

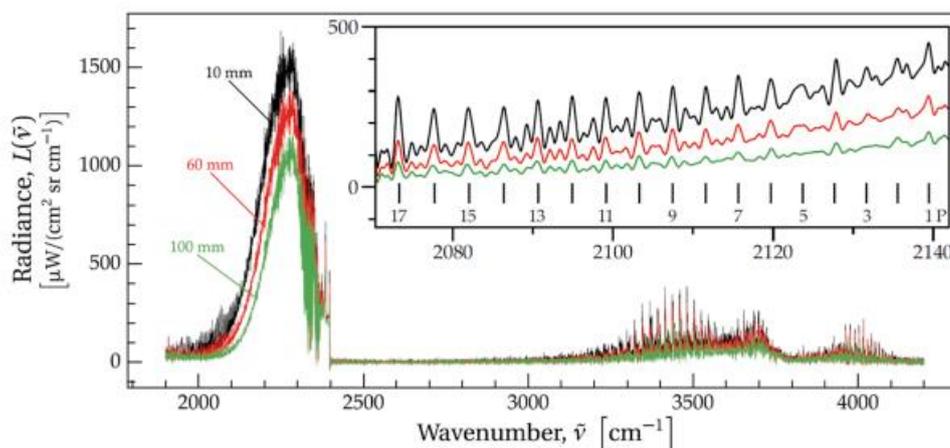


Figura 6.1.3: Espectros de muestra recopilados en tres alturas dentro de una llama de quemador Hencken. Se muestra en el recuadro la rama P correspondiente a las emisiones de CO. [27]

La temperatura y las concentraciones de especies se pueden obtener ajustando los cálculos a las mediciones de  $I_\lambda$ . Las frecuencias de muestreo que se pueden lograr utilizando termografía infrarroja varían según el instrumento y si se están midiendo uno o varios  $I_\lambda$ . Se ha informado de mediciones de intensidad de radiación utilizando una cámara de infrarrojos a una frecuencia de muestreo cercana a 4 kHz ; frecuencias de muestreo más altas son posibles (por ejemplo, cerca de 100 kHz) según la cámara específica y el tamaño de la porción activa del conjunto del plano focal. Las temperaturas y/o concentraciones de especies correspondientes pueden determinarse a la frecuencia de muestreo de la cámara, dependiendo de las suposiciones aplicadas al proceso inverso. Cabe destacar que los filtros pueden ser utilizados para cambiar de manera cíclica en la trayectoria óptica para medir diferentes  $\lambda$ . Las frecuencias de la rueda de filtros del orden de 100 Hz son posibles. En contraste con las cámaras infrarrojas, los IFTS pueden muestrear a frecuencias relativamente altas (por ejemplo, 10 kHz), pero la información espectral solo está disponible después de que el espejo de Michelson ha completado un barrido (por ejemplo, 1 Hz). Este último ha sido históricamente la frecuencia límite para analizar espectros detallados o determinar valores escalares.

La resolución espacial de las mediciones utilizando una cámara de infrarrojos o IFTS depende de la lente que se utilice, así como de la distancia desde el instrumento hasta el flujo de interés, de manera

similar a otras técnicas de imágenes. Las resoluciones espaciales representativas son del orden de  $0.25 \text{ mm}^2$  por píxel tanto para cámaras de infrarrojos como para IFTS. Existen lentes de microscopio disponibles que pueden utilizarse para lograr resoluciones espaciales del orden de  $100 \text{ }\mu\text{m}$ . Además, se encuentran disponibles paquetes de fibras que transmiten en el infrarrojo y pueden alojar 4000 fibras en una sección transversal de menos de  $9 \text{ mm}^2$ .

Los valores escalares determinados a partir de mediciones de intensidad pueden verse afectados seriamente por el modelo de radiación que se utilice y el rango de temperaturas. Por ejemplo, las temperaturas derivadas de una pluma reactiva utilizando modelos de radiación de línea por línea (utilizando HITEMP) y de banda estrecha (utilizando RADCAL) coincidieron entre sí dentro del 1% cuando las temperaturas estaban cerca de 1950 K, dentro del 5% para temperaturas cercanas a 2475 K y del 10% para temperaturas cercanas a 2800 K. Las correspondientes densidades de columna de  $\text{CO}_2$  determinadas utilizando los dos modelos de radiación coincidieron dentro del 10% al 20%, dependiendo de las temperaturas. Se pueden encontrar comparaciones adicionales de los espectros determinados utilizando modelos de radiación en el trabajo de otros investigadores .

### 6.1.2.2 DISPOSICIÓN EXPERIMENTAL Y CONSIDERACIONES

Una disposición experimental representativa para llevar a cabo la termografía infrarroja se ilustra en la [Figura 6.1.4](#). Casi todos los experimentos revisados en la Sección 3 tienen esta disposición general para recolectar mediciones. Específicamente, las cámaras o IFTS se posicionan de manera que el gas de interés pueda ser visualizado. Es posible utilizar espejos u otras ópticas para visualizar regiones a las que no se puede acceder a lo largo de líneas de visión, de manera similar a otras técnicas de imágenes. Puede ser necesario considerar las emisiones de radiación del fondo (por ejemplo, una pared) para un experimento, dependiendo de la relación entre las emisiones del flujo y las del fondo. El espaciado entre las cámaras se determinará en función de la óptica de la cámara (y la resolución espacial resultante) y consideraciones prácticas y de seguridad. Lo que varía principalmente entre los experimentos que aplican termografía infrarroja es el flujo de interés (por ejemplo, llama, pluma de escape, distribución de combustible) y los ajustes de la cámara (por ejemplo, tiempo de integración).

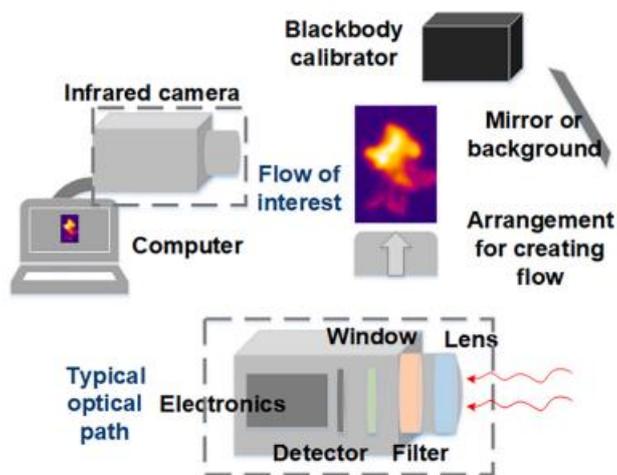


Figura 6.1.4: Ejemplo de disposición experimental para recolectar mediciones de intensidad de radiación de flujos de interés (panel superior). El panel inferior muestra una ruta óptica representativa a través de una cámara. [27]

Varios aspectos de la cámara y el flujo de interés deben considerarse al aplicar la termografía infrarroja. En primer lugar, debe existir un contraste entre el entorno y el flujo de interés para obtener mediciones útiles. Este contraste puede ser tanto las concentraciones de las especies radiantes como las temperaturas. Por ejemplo, es posible detectar concentraciones atmosféricas de  $\text{CO}_2$  en un entorno ambiente si la temperatura del gas está elevada, o identificar  $\text{CO}_2$  a temperaturas ambiente si la concentración está elevada. En cambio, no es posible utilizar la termografía infrarroja para estudiar chorros de aire a temperaturas y concentraciones ambiente cuando salen al aire; las emisiones y absorciones de radiación de los gases circundantes enmascararán las emisiones del chorro.

Una segunda consideración al aplicar la termografía infrarroja para estudiar flujos es que se debe identificar la resolución temporal requerida para el experimento y compararla con los tiempos de integración esperados. Esto puede ser especialmente importante para condiciones de alta velocidad o transitorias, donde el flujo emite relativamente baja intensidad. El tiempo de integración, o el tiempo durante el cual un detector puede recolectar fotones, debe especificarse mediante la frecuencia de muestreo o el tiempo mínimo requerido para recolectar una señal suficiente. Si el tiempo de integración es más largo que las escalas de tiempo relevantes, las características clave del flujo pueden ocultarse.

Un tercer aspecto a considerar es si el tiempo de integración objetivo requiere operar cerca de los conteos máximos o mínimos de fotones del detector. Muchos detectores cuánticos de infrarrojos

responden de manera no lineal cerca de estas regiones; por lo tanto, las mediciones pueden estar sesgadas si se aplica una curva de calibración lineal. En situaciones en las que los conteos de fotones emitidos por el flujo de interés están cerca de los límites de detección, puede ser recomendable colocar una fuente de radiación detrás del flujo de interés para aumentar la radiación incidente en el detector.

Una cuarta consideración al aplicar la termografía infrarroja para estudiar flujos es si múltiples especies emiten dentro del rango espectral que se está estudiando. Esta consideración puede ser importante al analizar los procesos físicos y químicos subyacentes que ocurren con el flujo. Partículas como el hollín irradian como emisores de banda ancha, mientras que las especies gaseosas irradian en espectros discretos.

Un quinto aspecto de la termografía infrarroja que debe considerarse son las influencias de las ventanas que se utilizan en el experimento. Las ventanas atenuarán las emisiones infrarrojas de los gases, irradiarán como una superficie y pueden reflejar o transmitir emisiones tanto de los medios participantes como del entorno. La absorción de radiación a través de las ventanas a menudo se puede aproximar mediante la inclusión de un fragmento de la ventana en la calibración y realizando sustracciones de fondo para aislar las emisiones del flujo. Se han reportado más conocimientos sobre cómo considerar las ventanas y las emisiones no deseadas dentro de las cajas por Kerst y Morris et al., respectivamente. Una lista breve de materiales de ventana que son candidatos adecuados para estudios de termografía infrarroja incluye zafiro,  $\text{CaF}_2$  cuarzo,  $\text{BaF}_2$ , entre muchos otros materiales. Harris proporcionó una lista de 35 materiales transmisores en el infrarrojo, así como las características refractivas, absorptivas y físicas de muchos de los materiales. Es importante tener en cuenta que incluso los materiales de ventana comunes (por ejemplo, sílice fundida) se han utilizado para la termografía infrarroja, aunque se debe aplicar una planificación cuidadosa para comprender qué espectros se transmiten a través de la ventana. Clave para utilizar tales materiales es asegurarse de que las emisiones del flujo sean relativamente altas.

La sexta consideración que debe tenerse en cuenta es la influencia potencial de la emisión o absorción de radiación infrarroja por parte de los medios participantes a lo largo de las líneas de visión. En particular, el  $\text{CO}_2$ , el  $\text{H}_2\text{O}$  y las partículas pueden alterar la radiación infrarroja procedente de la fuente que llega al detector, dependiendo de los espectros de interés. Incluso las concentraciones ambientales de especies radiantes pueden alterar los resultados. Un método aproximado para compensar la influencia de los medios ambientales en la intensidad medida es igualar la distancia entre la cámara y

el flujo de interés, y la cámara y el cuerpo negro. Este enfoque asume que la calibración se realiza en un entorno con las mismas concentraciones de especies radiantes. Un segundo y más riguroso enfoque para considerar la atenuación de las emisiones de radiación es modelar la emisión/absorción y considerarlas durante las etapas de calibración y análisis subsiguientes.

Una séptima consideración es que los detectores infrarrojos y las ópticas pueden autoemitir radiación, lo que podría sesgar los valores medidos. A menudo, los detectores se enfrían para reducir la cantidad de autoemisión y garantizar una emisión consistente. Se pueden utilizar dos o más calibraciones de punto utilizando fuentes de cuerpo negro para ayudar a tener en cuenta las autoemisiones. Se debe tener cuidado si la temperatura de las ópticas cambia durante las pruebas, ya que esto influye en la autoemisión.

### 6.1.2.3 TÉCNICAS DE DECONVOLUCIÓN INVERSA

Las técnicas inversas se utilizan para determinar valores escalares a partir de intensidades de radiación medidas, mientras que las técnicas de deconvolución se utilizan para considerar el componente espacial de la distribución de especies. La técnica inversa más simple se aplica en situaciones donde solo un valor escalar es desconocido y la distribución de valores escalares es uniforme a lo largo de la longitud del camino. Para determinar el valor escalar desconocido, la ETR se resuelve inicialmente utilizando la longitud del camino a través del flujo, los valores escalares conocidos y un valor estimado para el valor escalar desconocido. El valor escalar desconocido se actualiza hasta que el error entre los valores medidos y calculados sea aceptable. Se pueden utilizar múltiples herramientas para modelar las propiedades de transferencia de calor por radiación, incluidos los solucionadores de línea por línea (HITEMP) y los modelos de banda estrecha (RADCAL). Cuando se miden intensidades espectrales integradas, como las que se obtienen con cámaras infrarrojas, las  $I_\lambda$  calculadas se integran sobre el ancho espectral del detector y las ópticas antes de compararlas con las mediciones. Cuando se miden  $I_\lambda$ , como las obtenidas con un IFTS, las  $I_\lambda$  calculadas y medidas se comparan directamente y se utilizan para determinar los valores escalares. Los valores escalares derivados son típicamente promediados en el camino. Cabe señalar que el promedio en el camino no implica que los valores escalares derivados tengan igual peso en función de la longitud. Algunos valores escalares particulares (por ejemplo, temperaturas más altas) pueden influir desproporcionadamente en los valores promediados en el camino.

Cuando se deben determinar más de un valor escalar y la distribución a través del flujo es uniforme, se pueden considerar dos enfoques inversos, según las mediciones y las características del flujo. Cuando existe equilibrio químico entre las concentraciones de especies y las temperaturas (o se puede asumir razonablemente), entonces la ETR se puede resolver utilizando valores escalares en equilibrio. Por ejemplo, la temperatura de una llama que se determina utilizando una técnica inversa puede acoplarse con las fracciones molares correspondientes de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  en equilibrio en algunos casos. Este enfoque puede ser especialmente útil cuando solo se miden  $I$  o  $I_\lambda$  en una sola longitud de onda porque la solución está restringida (es decir, una incógnita). Cuando las mediciones de  $I_\lambda$  están disponibles en múltiples longitudes de onda, los valores escalares se pueden determinar de forma independiente. Para esta situación, los valores escalares se ajustan hasta que se alcanza una suma aceptable de los cuadrados de la diferencia entre las  $I_\lambda$  modeladas y medidas. Un enfoque para minimizar el error es utilizar una búsqueda directa de Nelder-Mead y una estrategia de minimización de errores de Levenberg-Marquardt al actualizar los valores escalares. Otros informes sobre la minimización de errores al ajustar  $I_\lambda$  han sido proporcionados por otros.

Una técnica de deconvolución se aplica junto con una técnica inversa para determinar la distribución espacial de los valores escalares. Quizás el enfoque de deconvolución más simple, y el que se ha aplicado más frecuentemente con la termografía infrarroja, es una técnica de pelado de cebolla (onion peeling). Con este enfoque, el flujo se considera como una serie de anillos concéntricos con valores escalares uniformes dentro de los anillos, como se ilustra en la [Figura 6.1.5](#). Se utiliza una técnica inversa para resolver los valores escalares para el(los) camino(s) que pasa(n) a través del anillo más externo (es decir,  $X_{i,1}$  y  $T_1$  en la [Figura 6.1.5](#)).

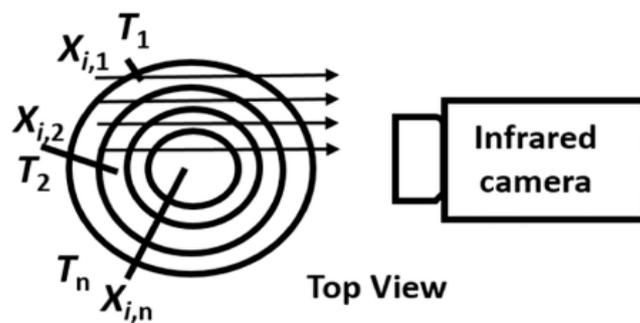


Figura 6.1.5: Distribución asumida de valores escalares cuando se aplica la técnica “Onion Peeling”. [27]

Con los valores escalares determinados para el anillo externo, el proceso se repite para longitudes de camino que pasan a través tanto del anillo más externo como de los anillos adyacentes. Este proceso se repite hasta que se hayan determinado los valores escalares en todo el dominio. Una debilidad de la técnica de pelado de cebolla es que los errores asociados con los valores escalares derivados para los caminos más externos se propagan a medida que se analizan los caminos adyacentes. Otras técnicas de deconvolución que no tienen esta debilidad (por ejemplo, el enfoque de deconvolución Abel de tres puntos, la regularización de Tikhonov y la de Fourier-Hankel pueden aplicarse potencialmente a la termografía infrarroja, aunque históricamente no se ha hecho. Recientemente, se ha utilizado un enfoque de aprendizaje automático para determinar valores escalares a partir de  $I_\lambda$  medidos con un IFTS. Se informa que este enfoque es eficiente y preciso. Independientemente de la técnica inversa, los problemas inversos son mal condicionados porque múltiples distribuciones de valores escalares pueden proporcionar la misma  $I_\lambda$ .

#### 6.1.2.4 INCERTIDUMBRES, ASUNCIONES E INFLUENCIA DEL ANÁLISIS

La incertidumbre de las mediciones de intensidad, así como de los valores escalares derivados, debe ser considerada, especialmente cuando se necesitan conclusiones cuantitativas. Para conclusiones cualitativas, comparaciones relativas de los valores medidos pueden ser suficientes. La incertidumbre general de las mediciones de intensidad (es decir,  $u_{total}$ ) incluye la incertidumbre asociada con las emisiones de radiación desde la fuente (es decir,  $u_{source}$ ) y la incertidumbre asociada con el instrumento y la calibración (es decir,  $u_{measurement}$ ):

$$u_{total} = \sqrt{u_{source}^2 + u_{measurement}^2} \quad (6.6)$$

Para referencia, se han informado valores de  $u_{total}$  cercanos al 10% (confianza del 95%) y al 5% para mediciones de  $I$ . Cabe señalar que estos valores están contextualmente basados, en gran parte, porque  $u_{source}$  puede variar significativamente dependiendo del experimento. Variaciones e incertidumbre en las características del flujo (por ejemplo, relaciones de equivalencia, valores escalares, distribución de valores escalares) contribuyen a  $u_{source}$ . Bonebrake y colegas buscaron identificar la contribución de  $u_{source}$  y  $u_{measurement}$  a  $u_{total}$ . Se encontró que  $u_{measurement}$  era despreciable en comparación con  $u_{source}$ . La primera se estimó mediante mediciones repetidas de  $I$  emitida desde un cuerpo negro a una temperatura constante, mientras que la última se determinó mediante mediciones repetidas de

emisiones de la fuente.  $u_{measurement}$  considera la incertidumbre asociada con el instrumento ( $u_{instrument}$ ) y la calibración ( $u_{calibration}$ ):

$$u_{measurement} = \sqrt{u_{calibration}^2 + u_{instrument}^2} \quad (6.7)$$

$u_{instrument}$  puede incluir la incertidumbre causada por el ruido del detector, fluctuaciones en la temperatura del detector, cambios en la conversión de fotones recibidos a voltaje, variaciones en la selectividad espectral del sistema y diferencias en la sensibilidad espacial (es decir, no uniformidad).  $u_{calibration}$  incluye la incertidumbre asociada con la fuente de cuerpo negro de referencia (por ejemplo, emisividad) y la temperatura de referencia del cuerpo negro.

Svensson y sus colegas buscaron identificar las contribuciones relativas de muchas (pero no todas) las fuentes de  $u_{measurement}$ . Se colocó una cámara infrarroja en un ambiente controlado por clima y se enfrentó a un cuerpo negro (es decir, una fuente de radiación conocida). La temperatura dentro del entorno de calibración se cambió sistemáticamente y se observó la influencia correspondiente en el  $I$  medido. El  $I$  emitido por la fuente ( $I_{source}$ ) se aproximó como:

$$I_{source} \approx \frac{\sqrt{y(i,j) - (C_{T1}T_{camera} + C_{To})t_{int}} - C_o}{C_1\tau_a^{eff}t_{int}} \quad (6.8)$$

$C_x$  representa los coeficientes de calibración promedio,  $C_{T,x}$  considera la respuesta del detector a la temperatura de la cámara ( $T_{camera}$ ),  $t_{int}$  es el tiempo de integración del detector,  $\tau_a^{eff}$  a considera la absorción de  $I_{source}$  a través de la atmósfera, e  $y(i,j)$  son las cuentas reportadas por la cámara. Cabe señalar que la ecuación (6.8) se puede modificar para que  $C_x$  sea específico para cada píxel en lugar de ser promedios. Svensson y sus colegas analizaron y reportaron la contribución relativa de los diversos términos en la ecuación (6.8) a la incertidumbre de la medición. Se destacan dos hallazgos. En primer lugar, la incertidumbre asociada a  $\tau_a^{eff}$  a puede ser el mayor contribuyente a la incertidumbre general para distancias relativamente largas (es decir, 1000 m en su estudio), pero insignificante para distancias relativamente cortas (es decir, 0,25 m en su estudio). En segundo lugar, las variaciones en la respuesta píxel a píxel pueden ser una fuente importante de incertidumbre, en particular cuando cambia la  $T_{camera}$ . Este último hallazgo resalta la importancia de mantener la cámara a una temperatura constante mientras se realizan las mediciones y realizar calibraciones para cada píxel para reducir la incertidumbre.

La propagación de la incertidumbre de las mediciones de intensidad a los valores escalares derivados puede ser una consideración importante. Un enfoque para considerar la propagación de la incertidumbre es realizar un estudio de sensibilidad y perturbar las entradas en la técnica inversa. Mediante este enfoque, se estimó una incertidumbre del 5% en las temperaturas derivadas debido a la incertidumbre en las mediciones de intensidad y la incertidumbre asociada con las longitudes del trayecto. Cabe destacar que este enfoque no considera la incertidumbre asociada con la intensidad de radiación modelada ni la incertidumbre en el ajuste de los datos a la intensidad medida. Una suposición clave con este análisis es que la distribución de los valores escalares es constante a lo largo de las líneas de visión. Ciertamente, esta suposición no es válida para algunos flujos y puede aumentar considerablemente la incertidumbre de los valores escalares derivados.

En cuanto a los valores escalares determinados utilizando un IFTS, se han reportado incertidumbres cercanas al 1% y 5% para las temperaturas y fracciones molares de  $H_2O$  (respectivamente) mediante un análisis de error de Monte Carlo de propagación de incertidumbre en la calibración de  $I_\lambda$ . Estos valores consideran tanto la incertidumbre asociada con la calibración como la incertidumbre del ajuste por regresión para determinar los valores escalares. La primera fuente de incertidumbre fue la más grande (es decir, de 5 a 15 veces más grande). Cabe señalar que los valores de incertidumbre son discutiblemente optimistas, ya que no estaba claro que se considerara la incertidumbre de las mediciones repetidas (es decir, incertidumbre de precisión) y se asumió que los valores escalares son uniformes a lo largo de las líneas de visión.

La incertidumbre asociada con la resolución espacial de las imágenes es otro aspecto de incertidumbre que puede necesitar ser considerado, dependiendo de la aplicación. Las incertidumbres en la resolución espacial son similares a otros sistemas de cámaras y están dictadas por la óptica y el número de píxeles en el conjunto de plano focal.

#### 6.1.2.5 DESARROLLO ESPACIAL Y VELOCIMETRÍA

Ya se trate de un flujo estable o inestable, es posible obtener información cualitativa sobre la evolución espacial y temporal a partir de las emisiones de radiación.

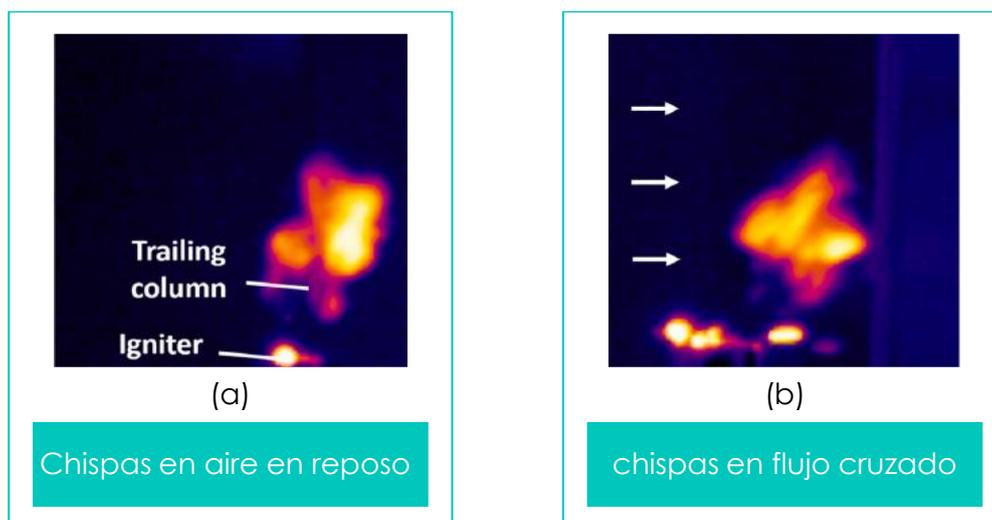


Figura 6.1.6: Imágenes infrarrojas de chispas en aire en reposo (a) y en flujo cruzado (b). [27]

La Figura 6.1.6 muestra imágenes infrarrojas de chispas distribuidas en el aire, sin que se produzca ninguna reacción. Para conseguir estas imágenes se dispuso un montaje similar al o mostrado en la Figura 6.1.4, añadiendo un encendedor para provoca las chispas (constituidas por regiones de aire calentado por medio de descargas de plasma). Lo que se observa en las imágenes es la radiación emitida por el vapor de agua y el  $\text{CO}_2$  presentes en el aire. Las vistas ortogonales de las chispas, que no se muestran, indican que se desarrollan en un vórtice toroidal que arrastra el aire circundante hacia el centro. Esto resulta en una reducción de la temperatura y, por lo tanto, en una disminución de la emisión de radiación en la región central.

Estos conocimientos sobre la dinámica de los fluidos tienen una aplicación práctica en la optimización de la distribución de los encendedores en los motores. Las mediciones presentadas en la Figura 6.1.6 y el análisis resultante se pueden ampliar para estudiar chorros inestables, identificar la dispersión de los gases y evaluar los fenómenos de flujo transitorio. Además, otros gases que emiten radiación infrarroja, como los hidrocarburos, el  $\text{H}_2\text{O}$ , el  $\text{NO}$  y el  $\text{CO}$  pueden ser objeto de estudio utilizando los filtros adecuados.

La incertidumbre asociada a de los campos de velocidad notificados es desconocida, aunque se espera elevada, tal y como muestran los siguientes experimentos:

- **Experimento n°1:** Se llevó a cabo la medición del campo de velocidad del aire en circulación entre copas de pino y abeto negro en llamas utilizando una cámara infrarroja. Las mediciones indicaron que la velocidad de las corrientes de aire oscilaba entre 20 y 30 m/s, y se observaron

vórtices de gran magnitud que contribuían a la transferencia de calor por convección en el interior de la llama.

- **Experimento n°2:** Similar al primero, pero con diferentes condiciones ambientales. La velocidad del viento en la zona de combustión alcanzó hasta 50 m/s, siendo superior en más de un orden de magnitud a la velocidad del aire ambiente.
- **Experimento n°3:** Consistió en la medición de la velocidad instantánea y promedio durante la quema de una serie de arbustos (Figura 6.1.7). Se observó la presencia de un núcleo central que aceleraba el fluido, formando grandes vórtices giratorios. Se estableció una correlación entre las velocidades máximas y promedio con la propagación del fuego.
- **Experimento n°3:** e realizó un análisis del flujo de escape de un motor F109, donde los gases de escape se desplazan de izquierda a derecha. Se recogieron mediciones utilizando un espectrómetro de transformación de Fourier (IFTS) ubicado para capturar las emisiones del penacho. La velocidad del flujo de masa gaseosa, estimada a partir de cambios en la ubicación de los remolinos, fue de 181 m/s, mientras que la velocidad estimada calculada a partir de variables conocidas, como el caudal de combustible/aire y la temperatura de salida, fue de 176 m/s.

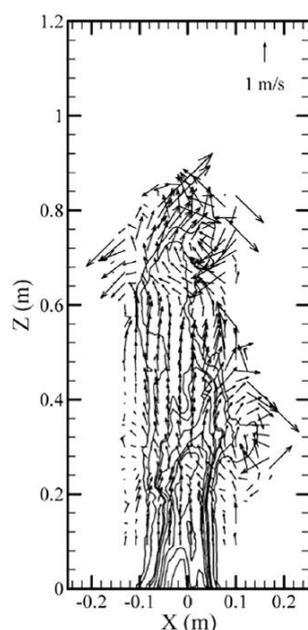


Figura 6.1.7 Campo de velocidades instantáneo determinado a partir de las temperaturas aparentes medidas por termografía infrarroja. [27]

Una ventaja de la termografía infrarroja en la determinación de velocidades de fluidos es que no requiere "seeding", aunque esto conlleva una mayor incertidumbre experimental y una menor resolución espacial. Se pueden introducir diferentes tipos de gases emisores de radiación en los flujos para aumentar las emisiones infrarrojas. Sin embargo, un desafío al utilizar la termografía infrarroja para establecer características y velocidades del flujo es la forma en que pueden evolucionar debido a la mezcla y transferencia de calor entre corrientes fluidas.

Las velocidades determinadas a partir de imágenes infrarrojas, como las mostradas en la [Figura 6.1.8](#), se pueden obtener aplicando un análisis de velocidades mediante la correlación de imágenes infrarrojas. Los diferentes colores en la [Figura 6.1.8](#) representan las temperaturas efectivas, que se determinan suponiendo que el gas emite radiación con una distribución de Planck. Es importante tener en cuenta que el campo de velocidad determinado a partir de las mediciones infrarrojas es un promedio ponderado del flujo en el caso de fluidos de poco espesor. En el caso de llamas de espesor considerable, las mediciones proporcionan información sobre el campo de velocidad más cercano al detector, pero no de los campos ubicados más allá de esa zona. Esto contrasta con las mediciones como las del tipo "Particle Image Velocimetry" (PIV), que se pueden utilizar para obtener mediciones bidimensionales o tridimensionales en diferentes planos. El PIV es una técnica de medición óptica utilizada para determinar el campo de velocidades en un fluido. Esta técnica se basa en la visualización de partículas trazadoras, generalmente partículas de humo, que se introducen en el fluido en estudio. Las partículas son iluminadas con un láser y se capturan imágenes de las partículas en diferentes momentos. A partir de la comparación de las posiciones de las partículas en las imágenes, se pueden obtener mediciones precisas de la velocidad y dirección del flujo en cada punto. El proceso de PIV implica el uso de algoritmos de correlación de imágenes para determinar el desplazamiento de las partículas entre diferentes imágenes. Estos desplazamientos se utilizan para calcular las componentes de velocidad en el plano de la imagen. Al repetir este proceso en múltiples ubicaciones en el fluido, se puede obtener un campo de velocidades bidimensional o tridimensional.

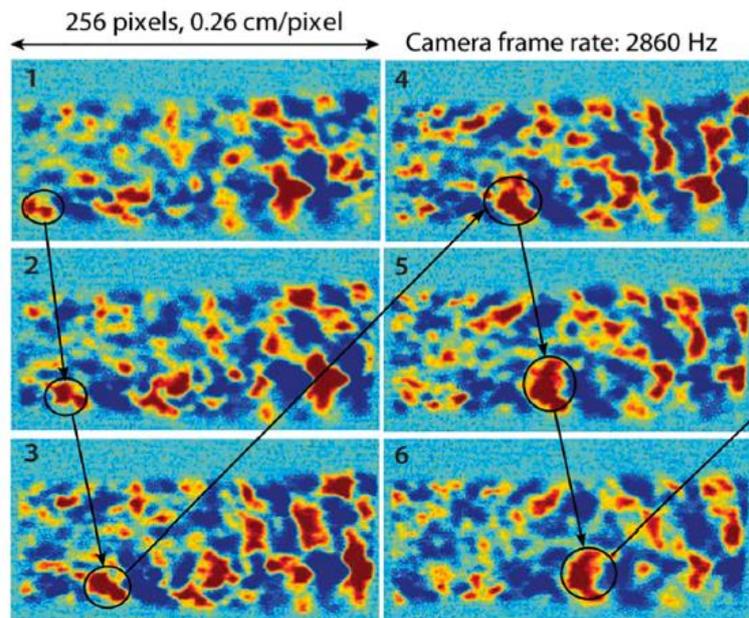


Figura 6.1.8 Capturas infrarrojas de remolinos en el conducto de escape de un motor F109. [27]

Las ventajas de la termografía infrarroja incluyen que no requiere un láser, no es necesario realizar "seeding" del flujo y puede aplicarse en lugares o escalas donde otras técnicas no son viables.

Se pueden utilizar imágenes visibles de elevada tasa de captura para estimar campos de velocidad correlacionando la intensidad de la luz visible en imágenes consecutivas. Sin embargo, la principal desventaja de esta técnica es la dificultad de identificar los gradientes de temperatura, especialmente en fluidos a altas temperaturas.

### 6.1.2.6 TURBULENCIA Y CARACTERÍSTICAS DE INESTABILIDAD DEL FLUJO

En el ejemplo experimental mencionado, se utilizaron mediciones de la intensidad de radiación infrarroja para caracterizar las turbulencias en un penacho de escape subsónico. El penacho es expulsado a través de una boquilla convergente simétrica y está compuesto por una mezcla de combustible "Jet A" y aire.

En el estudio, se realizaron mediciones de la intensidad de radiación en diferentes ubicaciones del penacho con el objetivo de analizar las características de las turbulencias presentes en el flujo. Algunas de las lecturas tomadas incluyen:

- La raíz cuadrada media (normalizada).

- Funciones de densidad de probabilidad.
- Coeficientes de correlación espacial.
- La función de densidad de potencia espectral normalizada.

Debido al tamaño pequeño de la muestra y la incertidumbre inherente de los instrumentos utilizados, la incertidumbre en las mediciones de la intensidad media de radiación llegó a ser superior al 30%. La [Figura 6.1.9](#) muestra las fluctuaciones normalizadas de la intensidad de radiación a la vez que caracteriza el estado de turbulencia del fluido. El factor de fluctuación de la intensidad de la radiación en las inmediaciones de la línea central ( $r/z = 0$ ) es nominalmente de hasta el 33% respecto al valor promedio, pero puede aumentar hasta factores superiores al 200% cerca de los bordes del flujo debido a las grandes variaciones en los valores escalares generados por el aire que se introduce progresivamente en el penacho. Cabe destacar que los valores normalizados desde la línea central ( $r/z = 0$ ) hasta el punto de inflexión ( $r/z = 0,1$ ) son similares a valores reportados en flujos reactivos, lo cual es algo notable teniendo en cuenta que:

- Los números de Reynolds de la mayoría de los experimentos de laboratorio ( $Re = 10.000$ ) son un orden de magnitud inferior en comparación con el penacho de escape ( $Re = 230.000$ ).
- La longitud del penacho es mucho más larga (9 cm) que las llamas típicas (1 cm).
- La temperatura máxima de las llamas típicas es aproximadamente dos órdenes de magnitud menor que la temperatura del penacho de escape experimental (900 K).

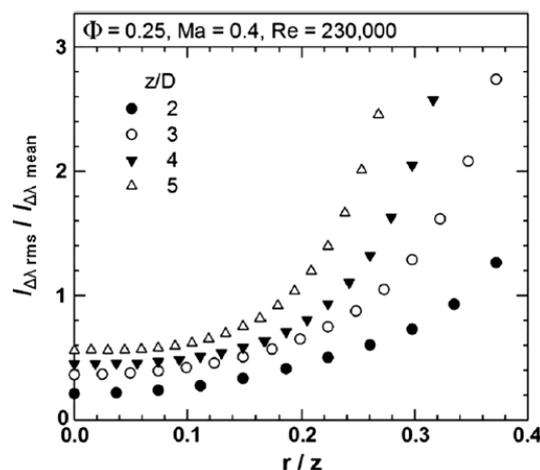


Figura 6.1.9 Fluctuaciones normalizadas de la intensidad de radiación de un conducto de escape. [27]

La observación de características turbulentas similares en flujos tan diferentes indica que las características turbulentas normalizadas de la radiación son muy similares en flujos con grandes diferencias en sus escalas y valores escalares.

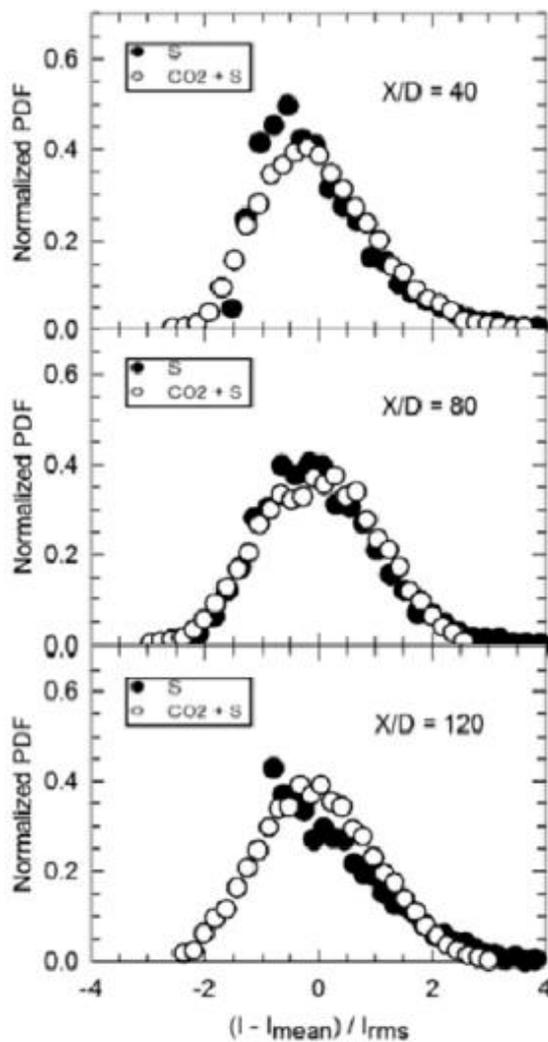


Figura 6.1.10: Distribución de probabilidad Normalizada de la radiación de intensidad emitida por hollín (S), CO<sub>2</sub> y una mezcla de CO<sub>2</sub> y hollín. [27]

Las emisiones de radiación turbulenta pueden variar dentro de un mismo flujo en función de la fórmula molecular del gas presente. Esto se puede observar en el ejemplo de una llama de difusión turbulenta de etileno, donde la función de densidad de probabilidad (PDF) de las emisiones de hollín muestra valores fluctuantes y una intensidad relativamente alta en ciertas áreas de la llama. Por otro lado, las PDF de las emisiones de radiación de la mezcla de CO<sub>2</sub> y hollín muestran una distribución gaussiana

en relación a la intensidad media. La asimetría en las emisiones de hollín se debe a la formación, desintegración, calentamiento y enfriamiento del hollín, mientras que el  $\text{CO}_2$  se produce sin experimentar estos fenómenos desintegrativos.

La incertidumbre de las mediciones de la intensidad media de radiación en este caso particular fue del 10%. En investigaciones relacionadas, donde se recogieron y compararon las emisiones de radiación de múltiples llamas turbulentas no premezcladas, se llegó a la conclusión de que los coeficientes de autocorrelación espacial y las escalas de longitud integral de las emisiones de radiación (específicamente del vapor de agua) eran aproximadamente similares para llamas de diferentes magnitudes. Esta observación respalda la teoría de que las estadísticas normalizadas de radiación turbulenta tienden a ser similares entre diferentes flujos. La explicación de este fenómeno radica en el proceso común de mezcla entre las llamas y el aire circundante.

Las inestabilidades de la combustión pueden determinarse a partir de mediciones termográficas dada la relación entre las citadas emisiones de radiación y el movimiento del fluido. En ejemplo, se utilizó una cámara de infrarrojos para medir la intensidad de la radiación emitida por una llama de propano ( $\text{Re} = 32.000$ ) colocada tras un cuerpo en forma de V. La cámara se fijó de forma ortogonal a la sección de ensayo y captaba la llama a través de una ventana de  $\text{CaF}_2$ . La inestabilidad de la llama se manifestó en dos aspectos de las medidas (Figura 6.1.11):

- Se observó que la intensidad de radiación normalizada aguas abajo del cuerpo en forma de V disminuía periódicamente y luego volvía a los valores nominales. Estas reducciones en la intensidad no se observaron durante condiciones de funcionamiento estables y se atribuyeron a extinciones locales del frente de llama. Esto indica que la combustión experimentaba interrupciones temporales en ciertas regiones de la llama.
- Se identificó una inestabilidad acústica. En el espectro infrarrojo, estas inestabilidades se manifestaban como fluctuaciones cíclicas en las emisiones de radiación. Estos cambios en la intensidad de la radiación se debían principalmente a las fluctuaciones en la temperatura de la llama. Las funciones de densidad de potencia espectral de la intensidad de la radiación mostraban un pico prominente cerca de 120 Hz, mientras que las mediciones de presión correspondientes tenían un pico similar cerca de 115 Hz. Esto indica una correlación entre las fluctuaciones en la radiación y las fluctuaciones de presión asociadas con la inestabilidad acústica.

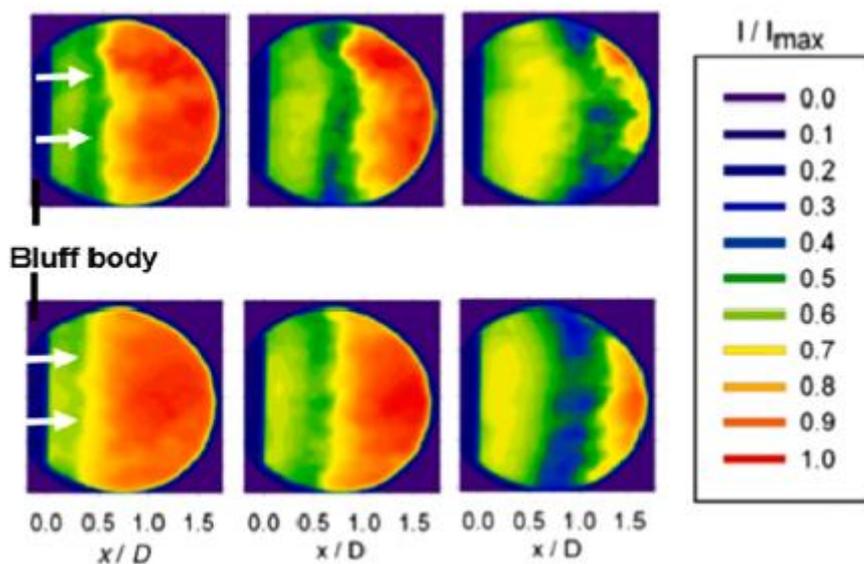


Figura 6.1.11: Emisiones de intensidad de radiación normalizadas por una llama estabilizada con inestabilidad acústica. [27]

Un trabajo más reciente ilustra cómo la termografía infrarroja puede ser para determinar las escalas de longitud de las turbulencias en las llamas para combustibles tales como el benceno, queroseno, madera de pino, agujas de cedro...

En el estudio comparativo entre las mediciones de la escala de longitud obtenidas mediante Particle Image Velocimetry (PIV) y la termografía infrarroja, se utilizaron combustibles líquidos contenidos en un recipiente y combustibles sólidos distribuidos en una superficie plana de 176 cm<sup>2</sup>.

Se utilizaron distribuciones no homogéneas en la temperatura aparente de las llamas como marcadores durante el análisis. Estas distribuciones no homogéneas sirvieron como indicadores de los remolinos turbulentos de mayor magnitud presentes en la combustión. La [Tabla 6.1.1](#) presenta los resultados de las mediciones de las escalas de longitud de los remolinos turbulentos obtenidos mediante ambas técnicas (PIV y termografía infrarroja). Estos resultados permiten comparar la capacidad de ambas técnicas para caracterizar la turbulencia en los diferentes tipos de combustión estudiados.

Tabla 6.1.1: Comparación entre escala de longitud de remolinos turbulentos mediante el uso de termografía infrarroja y PIV. [27]

Fuel	Flame length [m]	Eddy size from IR thermography [m]	Eddy size from PIV [m]
Benzene	0.7	0.025 ± 0.005	0.024 ± 0.003
Kerosene	0.7	0.157 ± 0.006	0.019 ± 0.003
Diesel	0.5	0.025 ± 0.0055	0.019 ± 0.005
Cedar needles	0.8	0.62 ± 0.013	0.029 ± 0.004

Aunque estos resultados están limitados a las características turbulentas de las emisiones de radiación, el trabajo computacional de Matsuyama indica que las escalas de longitud de las turbulencias, determinadas a través de las emisiones de radiación y la temperatura están directamente relacionadas. Es instructivo considerar las ventajas y desventajas de utilizar termografía infrarroja para identificar la turbulencia y las características inestables.

Las ventajas de utilizar termografía infrarroja para identificar las turbulencias y las características inestables incluyen:

- **Facilidad de implementación para la recogida de datos:** La termografía infrarroja es relativamente fácil de implementar y requiere menos tiempo de preparación en comparación con otras técnicas de medición. Esto significa que se pueden realizar mediciones de manera más rápida y eficiente, lo que resulta beneficioso en términos de tiempo y recursos.
- **Capacidad de implementación para experimentos que no propicios para la “seeding”:** Algunos casos, puede ser difícil o impracticable utilizar técnicas de “seeding”, como el uso de partículas o trazadores. La termografía infrarroja no requiere siembra de flujo, lo que la convierte en una opción viable en experimentos donde esta técnica no es adecuada.

Por otra parte, las desventajas comprenden:

- **Necesidad de acceso óptico:** La termografía infrarroja requiere un acceso óptico claro y directo al objeto o flujo que se está estudiando. Esto puede limitar su aplicabilidad en entornos o situaciones donde no se puede lograr un acceso adecuado.

- **Imposibilidad de medición del campo de velocidades de forma directa:** A diferencia de algunas técnicas de medición, como la PIV, la termografía infrarroja no permite medir el campo de velocidades de forma directa. En su lugar, proporciona información sobre la distribución de temperaturas y emisiones de radiación, que se pueden utilizar para inferir características turbulentas, pero no proporciona mediciones directas de velocidades.

### 6.1.2.7 DISTRIBUCIÓN DE LOS TIPOS DE GAS EN LOS FLUJOS

En el experimento mencionado, se utilizó el hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ) para dopar el aire calentado y se visualizó la distribución del aire a su salida en forma de chorros simétricos y bidimensionales. El dopaje con  $\text{SF}_6$  permite utilizar la radiación emitida por este gas como un marcador para analizar la dispersión y distribución de los gases en el flujo. Es importante mencionar que, para obtener una imagen clara de la distribución del aire dopado, se realiza la sustracción de la radiación de fondo. Esto implica restar la radiación emitida por el entorno o el fondo para aislar la radiación específica de  $\text{SF}_6$  y resaltar su distribución en el flujo. La elección del  $\text{SF}_6$  se basa en varias características ventajosas:

- **Nula toxicidad e inflamabilidad:** El  $\text{SF}_6$  es un gas no tóxico y no inflamable, lo que lo hace seguro y fácil de manejar en experimentos. Esto es especialmente importante al trabajar con gases en entornos de laboratorio o aplicaciones industriales, donde la seguridad es primordial.
- **Emisión de radiación en una longitud de onda específica:** El  $\text{SF}_6$  emite radiación en una longitud de onda de 10,56  $\mu\text{m}$ . Esta característica es importante porque permite utilizar una cámara de infrarrojos de onda larga que es sensible a longitudes de onda en el rango de 8 a 13  $\mu\text{m}$ . La elección de una cámara de infrarrojos de onda larga específica facilita la detección y visualización de la radiación emitida por el  $\text{SF}_6$ .

En el experimento realizado por Harley y sus colaboradores, se midieron los espectros detallados de las emisiones de radiación de una llama de chorro turbulento no premezclado. Estas mediciones se llevaron a cabo utilizando un IFTS (Interferómetro de Transformada de Fourier) y una disposición experimental similar a la mostrada en la [Figura 6.1.10 \(a\)](#).

En la [Figura 6.1.12](#), se muestran los espectros de emisión de radiación obtenidos. Se realizaron mediciones de dos especies específicas: metano ( $\text{CH}_4$ ) en el panel inferior y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en el panel superior. Se observa que la emisión de  $\text{CH}_4$  tiende a concentrarse en una región más pequeña en comparación con la emisión de  $\text{CO}_2$ .

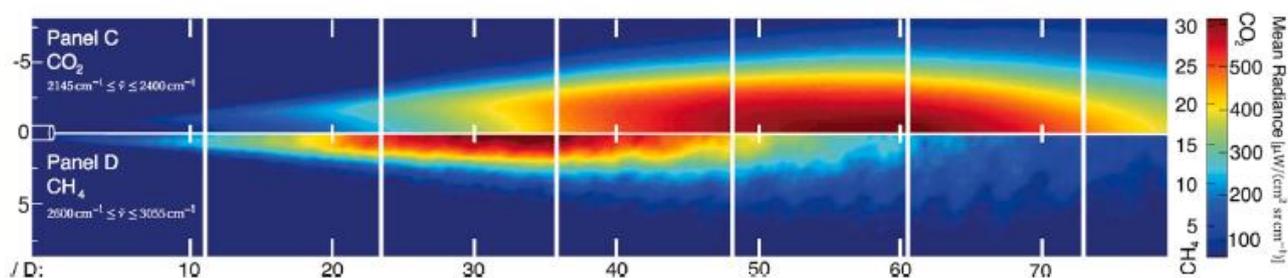


Figura 6.1.12: Intensidad media de la radiación emitida por el  $\text{CO}_2$  (panel superior) y el  $\text{CH}_4$  (panel inferior) en una llama turbulenta no premezclada (DLR-A). [27]

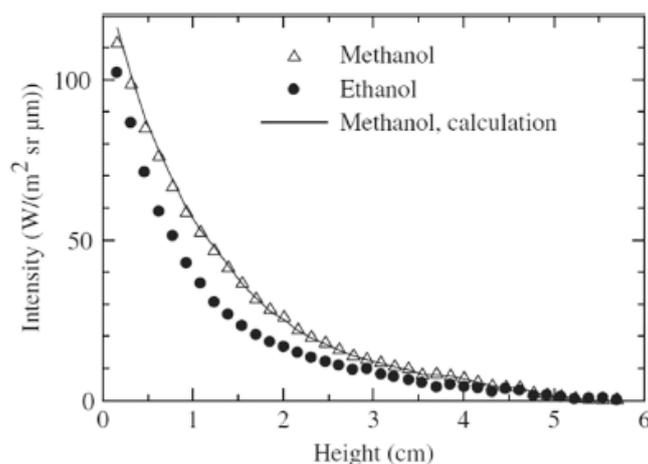
La razón de esta diferencia en la distribución de emisiones se debe al consumo del combustible a medida que pasa a través de la llama. El pico de emisión de  $\text{CH}_4$  se encuentra aproximadamente a 35 cm por encima del quemador, donde las temperaturas son más altas y la longitud de trayectoria es mayor. En cambio, las emisiones de  $\text{CO}_2$  se extienden más allá de la punta de la llama, ya que el  $\text{CO}_2$  no se consume al pasar a través de la lámina de la llama.

Es importante tener en cuenta que las mediciones de emisiones presentan incertidumbres, que en este caso oscilaron entre el 4% y el 20%, dependiendo de la ubicación dentro de la llama. Estas incertidumbres reflejan la variabilidad en las mediciones y deben tenerse en cuenta al analizar los resultados.

En resumen, el experimento de Harley y sus colaboradores proporcionó información detallada sobre los espectros de emisión de radiación de una llama de chorro turbulento no premezclado. Se observó una diferencia en la distribución de las emisiones de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  debido al consumo del combustible en la llama, lo cual es relevante para comprender el comportamiento de la combustión y las características de las especies presentes en el flujo.

En un estudio relacionado, se utilizó la intensidad de radiación como una herramienta para identificar la distribución del combustible y los productos de la combustión. Se realizaron mediciones bidimensionales de intensidad de radiación utilizando una cámara colocada en una disposición similar a la mostrada en la Figura 6.1.4. Se observó que a medida que se aumentaba la distancia desde la salida del quemador, las emisiones de intensidad de radiación de los combustibles experimentaban una disminución abrupta. Esta disminución se atribuyó al proceso de pirólisis, que es la descomposición térmica del combustible en presencia de calor.

La [Figura 6.1.13](#) muestra esta disminución abrupta en las emisiones de intensidad de radiación a medida que aumenta la distancia. Esta información proporciona una indicación de la distribución espacial de los combustibles y los productos de la combustión a lo largo del flujo. Específicamente, la disminución en las emisiones de intensidad de radiación indica la descomposición del combustible a medida que se aleja del quemador.



[Figura 6.1.13](#): Intensidad de radiación media captadas para una longitud de onda de  $9.68 \mu m$ . [27]

Estas mediciones bidimensionales de intensidad de radiación permiten obtener información valiosa sobre la distribución y el comportamiento de los combustibles y los productos de la combustión en el flujo. Ayudan a comprender los procesos de pirólisis y la evolución de las especies químicas a lo largo del flujo, lo que contribuye a una mejor comprensión de los fenómenos de la combustión y la optimización de los sistemas de combustión.

El trabajo de Parent demuestra cómo se puede aplicar la termografía infrarroja para cuantificar la distribución de los productos de la combustión en flujos dominados por fenómenos de flotabilidad. En el experimento, se utilizó una cámara de infrarrojos equipada con filtros de banda estrecha para recoger las emisiones

Cada filtro se utilizó para aislar las emisiones de diferentes especies gaseosas, como se muestra en la [Figura 6.1.14](#). Se observó que la contribución del hollín a las emisiones de radiación totales era menor en comparación con la contribución del  $CO_2$ , que emite radiación principalmente en la superficie de la llama cerca de la zona de suministro de combustible. Además, la radiación del hollín se distribuía

ampliamente por toda la llama, mientras que la radiación del CO<sub>2</sub> estaba más localizada. de radiación provenientes de la combustión de vegetación.

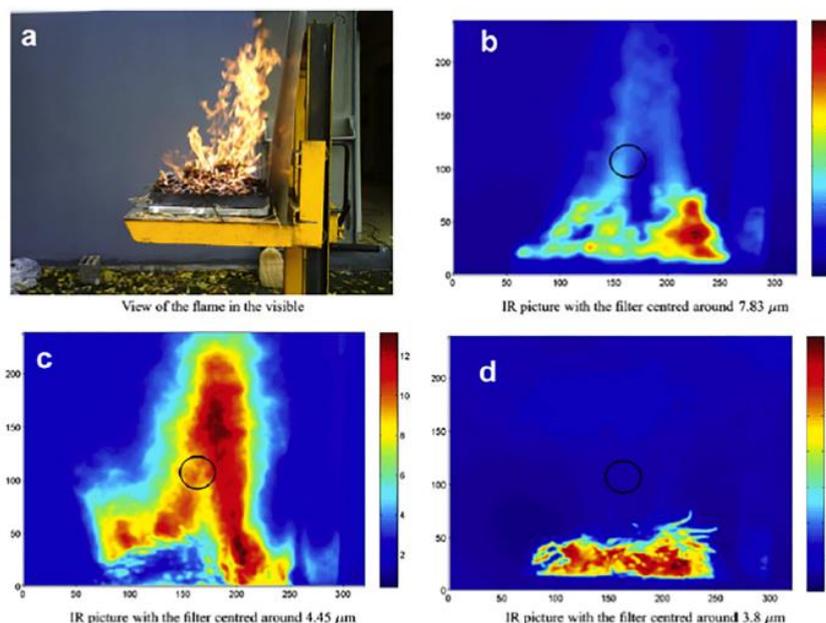


Figura 6.1.14: Imagen visible (a), emisiones de radiación procedentes del H<sub>2</sub>O (b), del CO<sub>2</sub> (c) y del hollín y combustibles (d). [27]

La concentración de especies gaseosas se pudo determinar a partir de las mediciones de la intensidad de radiación, conocida la temperatura y las longitudes. Esto contrasta con estudios anteriores en los que se deducían las distribuciones de especies gaseosas a partir de las mediciones de intensidad de radiación sin llegar a determinar las concentraciones.

Con el objetivo de identificar cambios temporales y espaciales en la concentración de especies gaseosas, se determinó la concentración de CO<sub>2</sub> y C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> en el interior de burbujas midiendo las emisiones de radiación y la absorción. Se colocó una fuente de rayos infrarrojos detrás de una sección de prueba, y la intensidad medida variaba a medida que el flujo pasaba por el canal debido a la absorción.

La Figura 6.1.15 muestra la evolución temporal de la concentración de CO<sub>2</sub> dentro de una burbuja inyectada en un lecho fluidizado que contiene perlas de vidrio y N<sub>2</sub> como gas portador. Se observa que las burbujas disminuyen de tamaño con el tiempo y que la concentración de CO<sub>2</sub> es menor en el espacio central de la burbuja. Esta tendencia se debe a que el CO<sub>2</sub> del centro de la burbuja se mezcla más fácilmente en los alrededores del espacio interior de la burbuja debido a la presencia de vórtices

centrales. Fuera de la burbuja no se observa  $\text{CO}_2$  debido a que las perlas de vidrio del lecho fluidizado absorben la radiación infrarroja y bloquean su transmisión.

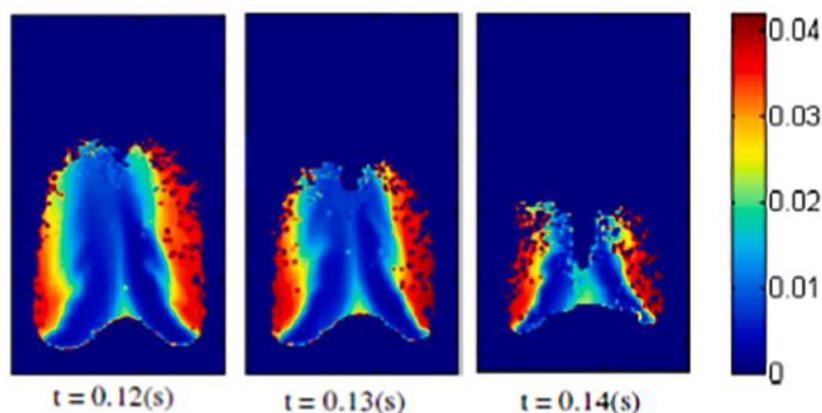


Figura 6.1.15: Concentración de  $\text{CO}_2$  (mol/l) en el interior de burbujas. [27]

En el ejemplo mencionado de Gálfalk y sus colegas, utilizaron mediciones de intensidad de radiación de resolución espectral recogidas con un generador de imágenes hiperespectral para determinar la concentración y los flujos de  $\text{CH}_4$  en diferentes fuentes, como las emisiones de vacas, la incineración de residuos y los lodos de aguas residuales. Las incertidumbres típicas de los valores derivados eran del 5% al 10%.

Estas mediciones permitieron determinar los flujos de  $\text{CH}_4$  a distancia, incluso a distancias de varios kilómetros, y proporcionaron información espacial sobre la distribución de los gases en el espacio. Por ejemplo, la Figura 6.1.16 muestra la distribución de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{N}_2\text{O}$  determinada a partir de los espectros recogidos con un generador de imágenes hiperespectral a una distancia de 61 metros. Los flujos de los gases se determinaron correlacionando las velocidades del viento (obtenidas a partir de las características de seguimiento de las imágenes) con las concentraciones de los gases.

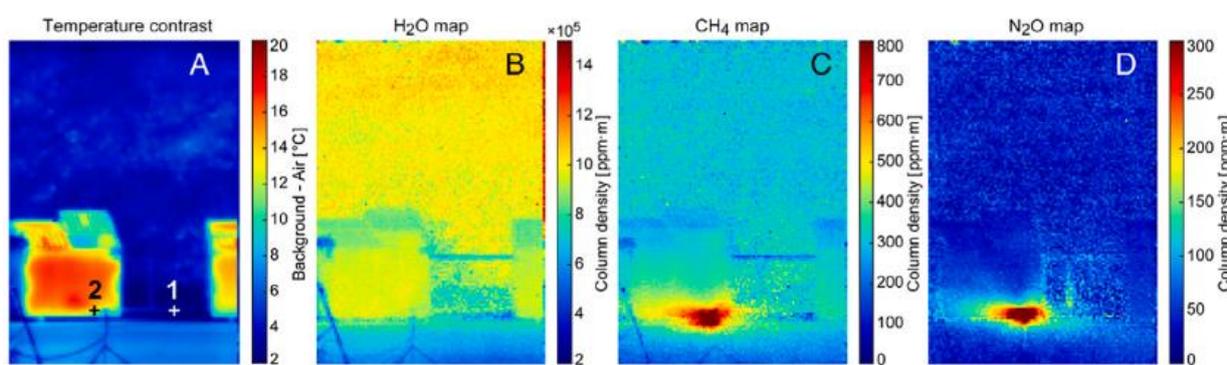


Figura 6.1.16: Distribución de temperatura (A), H<sub>2</sub>O (B), CH<sub>4</sub> (C) y N<sub>2</sub>O (D) de los gases de control. [27]

Las mediciones de intensidad de radiación de resolución espectral ofrecen varias ventajas en este contexto. En primer lugar, se pueden realizar a distancia, lo que permite la monitorización de emisiones en áreas extensas sin la necesidad de acercarse físicamente a la fuente. Además, proporcionan información espacial detallada sobre la distribución de los gases, lo que ayuda a comprender la dispersión y transporte de los mismos en el entorno. Estas mediciones también tienen la capacidad de correlacionar las concentraciones de gases con las características del flujo, como las velocidades del viento, lo que proporciona una comprensión más completa de los procesos de transporte y dispersión de los gases.

En resumen, las mediciones de intensidad de radiación de resolución espectral, como las utilizadas por Gálfalk y colaboradores, ofrecen una forma precisa y no invasiva de determinar la concentración y los flujos de gases, y permiten obtener información espacial detallada sobre su distribución en el entorno. Estas mediciones son especialmente útiles en estudios de emisiones a gran escala y en situaciones donde el acceso físico a la fuente de emisión es difícil o peligroso.

En el ejemplo mencionado, se muestra cómo la termografía infrarroja puede utilizarse para detectar la presencia de especies que no son detectables mediante otras técnicas o en otras longitudes de onda. La Figura 6.1.17 ilustra esto mediante la comparación de las emisiones infrarrojas y ultravioleta (UV) de una mezcla en llamas de perclorato de amonio (AP) y polibutadieno terminado en hidroxilo (HTPB).

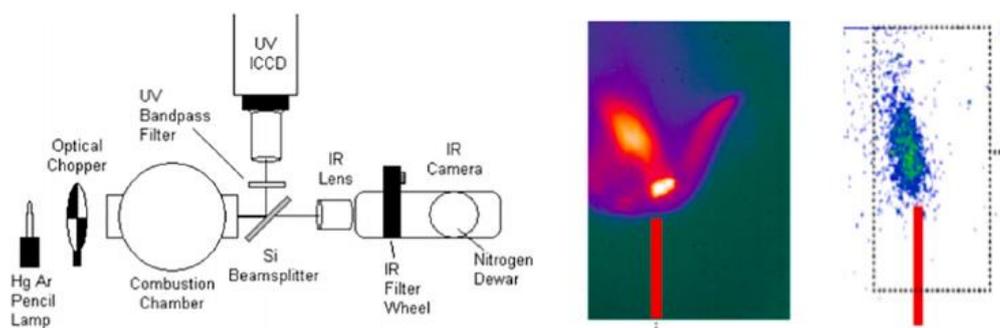


Figura 6.1.17: Imágenes infrarrojas y ultravioleta de una mezcla de AP y HTPB en proceso de combustión. [27]

La imagen infrarroja en el panel central muestra dos regiones de elevada intensidad, mientras que la imagen UV en el panel derecho muestra únicamente las emisiones de una de esas regiones. Las diferentes regiones que se observan en las dos imágenes se atribuyen a la emisión de  $\text{OH}^*$  en UV o de HCl en el infrarrojo. En particular, las dos regiones perceptibles en el infrarrojo se atribuyen a llamas de difusión primarias y finales.

Esta capacidad de la termografía infrarroja para detectar emisiones específicas de especies químicas proporciona información valiosa sobre la composición y la distribución de los productos de combustión. Al utilizar diferentes longitudes de onda y filtros, es posible identificar y distinguir las emisiones de diferentes especies, lo que permite una caracterización más precisa de las llamas y los procesos de combustión.

### 6.1.2.8 DISTRIBUCIONES DE TEMPERATURA

En el ejemplo mencionado, se describe cómo la temperatura de los flujos puede determinarse a partir de la intensidad de radiación mediante técnicas inversas y conocimiento de las concentraciones de las especies radiantes. En el caso de un flujo no reactivo estudiado por Rankin y sus colegas, se aplicó esta técnica para determinar la temperatura de un penacho de escape procedente de una turbina accionada por un motor de detonación de pulsos (PDE).

La disposición experimental utilizada fue similar a la mostrada en la Figura 6.1.10 (a), con la excepción de que la fuente de ignición fue reemplazada por el PDE. La concentración del gas estudiado,  $\text{CO}_2$ , se estimó mediante cálculos de equilibrio químico para el cálculo de la temperatura.

Los resultados del experimento fueron los siguientes:

- Se observó una incertidumbre del 15% en las mediciones de intensidad, lo que derivó en una incertidumbre del 7% en las temperaturas determinadas.
- Se encontró que el aumento del volumen de combustible que llenaba el tubo de detonación conducía a un aumento en la temperatura máxima. Sin embargo, este incremento no fue tan pronunciado en las temperaturas medias, como se muestra en la [Figura 6.1.18](#).
- Por otro lado, se observó que el aumento de la frecuencia de funcionamiento del motor no tuvo ningún efecto sobre la temperatura máxima.
- Finalmente, se encontró que el aumento de la relación de equivalencia (relación entre el combustible y el oxidante) sí afectaba a la temperatura media, como era de esperar.

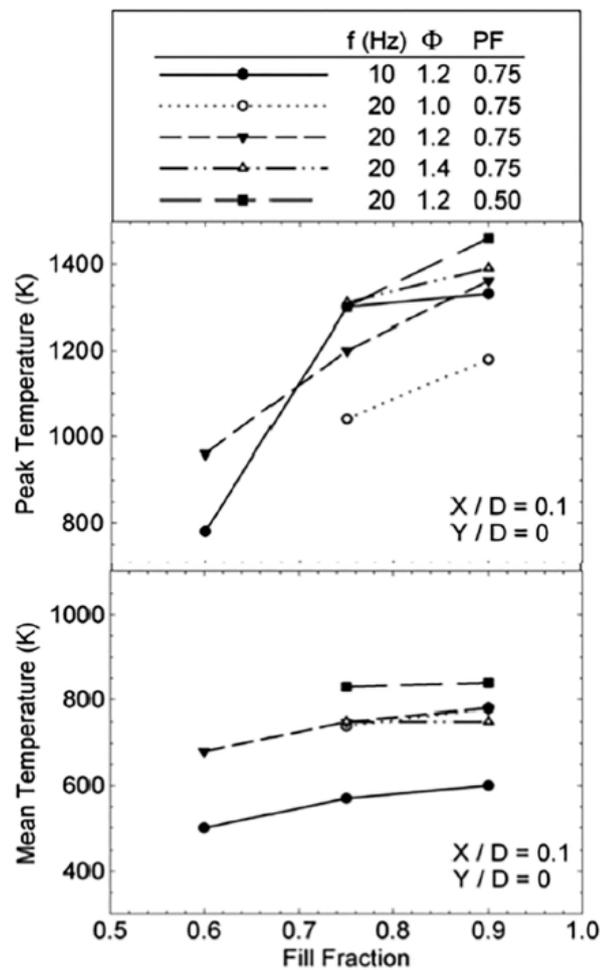


Figura 6.1.18: Temperaturas máximas (panel superior) y medias (panel inferior) de un penacho de escape procedente de una turbina accionada por un motor de detonación de pulsos (PDE). Los valores fueron obtenidos empleando una técnica de deconvolución de las medidas de intensidad de radiación. [27]

Es correcto que determinar las temperaturas en flujos reactivos a partir de mediciones de intensidad de radiación presenta desafíos, especialmente cuando se utiliza una única banda espectral, como en el caso de una cámara termográfica de canal único. Esto se debe a las variaciones espaciales y temporales de las concentraciones de especies y temperaturas, lo que implica la presencia de valores desconocidos en una sola medición.

Sin embargo, es posible superar este desafío asumiendo una correlación entre la temperatura y la concentración de las especies radiantes basada en el equilibrio químico. Al medir la intensidad de la radiación emitida por el vapor de agua, por ejemplo, se puede determinar la evolución de la temperatura media de los núcleos de ignición formados en un túnel de viento con mezclas de  $\text{CH}_4$ /aire.

Al hacer esta asunción y realizar las mediciones adecuadas, es posible obtener información sobre la evolución de la temperatura en el flujo reactivo. Es importante tener en cuenta que esta técnica se basa en la correlación entre la temperatura y la concentración de especies radiantes, y depende de que se cumpla el equilibrio químico. Además, es necesario considerar las limitaciones inherentes a la medición de una sola banda espectral y las posibles fuentes de error asociadas.

Las temperaturas también pueden determinarse para flujos reactivos a partir de mediciones de intensidad de radiación, aunque hacerlo a partir de una única banda espectral (cámara termográfica de canal único) plantea un importante reto, y es que las concentraciones de especies y las temperaturas pueden variar tanto espacial como temporalmente (situación en la que hay valores desconocidos para una medición). Este problema se puede solventar si se puede asumir que la temperatura y la concentración de las especies radiantes están correlacionadas por el equilibrio químico. Mediante esta asunción, y midiendo la intensidad de la radiación emitida por el vapor de agua de agua, se puede llegar a determinar, por ejemplo, la evolución de la temperatura media de los núcleos de ignición formados en un túnel de viento con mezclas de  $\text{CH}_4$ /aire.

En la [Figura 6.1.19](#) se observa que las frecuencias de descarga cercanas a 100 kHz produjeron las temperaturas más altas. El enfoque de obtención de los datos de la [Figura 6.1.19](#) puede extenderse a cualquier flujo reactivo, para la obtención de temperaturas, siempre que la suposición de equilibrio

químico sea válida. En caso de que no se cumpla el equilibrio químico, sería necesario contar con información espectral adicional para determinar las temperaturas, lo cual se discutirá en el siguiente apartado.

Otra técnica para determinar la temperatura de los gases a partir de las mediciones de intensidad de radiación es la “Pirometría de filamento fino” (TFP). En dicha técnica, se insertan filamentos de poca sección (filamentos del orden de  $10^1$  s de  $\mu\text{m}$ ; a menudo hechos de SiC) en un flujo para después realizar una medición de las emisiones de radiación de dichos filamentos. Las mediciones de radiación se relacionan con la temperatura de los filamentos, la cual a su vez está relacionada con la temperatura de los gases circundantes. Se trata por tanto de una técnica intrusiva que depende de las emisiones de la superficie de los filamentos.

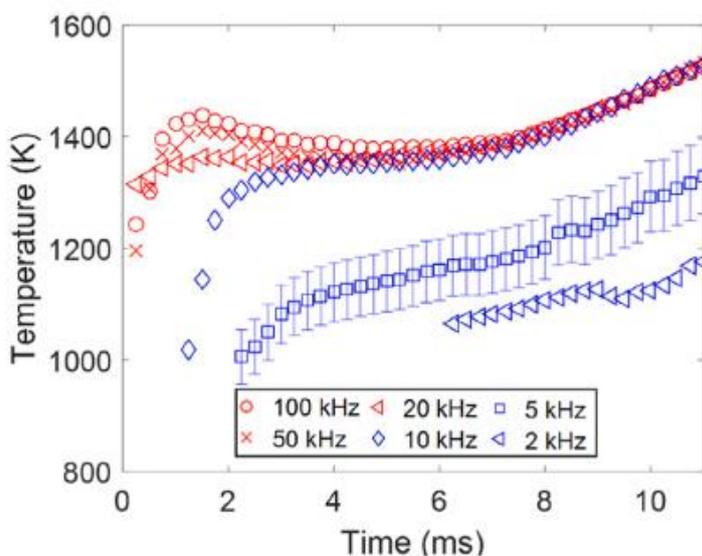


Figura 6.1.19: Evolución temporal de la temperatura en función de la frecuencia de descarga de plasma (se muestran las barras de incertidumbre). La temperatura fue determinada a partir de los valores máximos de intensidad de radiación. [27]

Un ejemplo de aplicación de la TFP es su uso en combinación con imágenes infrarrojas para determinar la temperatura y la distribución de los productos de escape generados por la ignición hipergólica de una gota de monometilhidracina y ácido nítrico. En la Figura 6.1.20 se muestra la gota ubicada en la parte inferior de la imagen y tres filamentos equidistantes a lo largo del eje indicado en la imagen. Las temperaturas máximas, que no se muestran en la figura, se encontraron cerca del eje central y

disminuyeron de manera no lineal en dirección radial (lo cual se atribuye al arrastre de los gases). A lo largo del eje axial, las temperaturas disminuyeron de forma lineal con la distancia a la gota.

La distribución espacial de la relación oxidante-combustible se estimó al comparar las temperaturas adiabáticas de la llama con los valores medidos. Este análisis proporciona información sobre la distribución estructural de las llamas y puede utilizarse para evaluar los resultados de modelos previos.

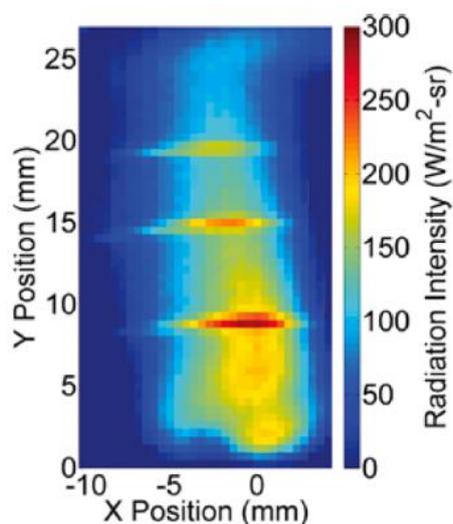


Figura 6.1.20: Intensidad de radiación emitida por tres filamentos situados aguas debajo de una llama. [27]

### 6.1.2.9 DISTRIBUCIONES SIMULTÁNEAS DE ESPECIES Y TEMPERATURAS

La termografía infrarroja en combinación con técnicas de deconvolución permite determinar tanto la temperatura como las concentraciones de las especies gaseosas en un flujo reactivo.

En un estudio realizado en una llama de hidrógeno inestable, se recolectaron mediciones simultáneas de la intensidad de radiación emitida por los filamentos finos y el vapor de agua utilizando una cámara infrarroja equipada con un filtro de banda estrecha ( $2,77 \pm 0,12 \mu\text{m}$ ), en una configuración similar a la Figura 6.1.10 (a).

Las temperaturas máximas medidas mediante la técnica de la pirometría de filamento fino (TFP) y las temperaturas calculadas coinciden y tienen distribuciones espaciales similares. Además, la fracción molar de vapor de agua en la llama se determinó utilizando las temperaturas y las mediciones de intensidad de las zonas adyacentes a la superficie de los filamentos. Las fracciones molares de vapor

de agua medidas y calculadas capturaron las variaciones en la distribución del vapor de agua a medida que las llamas cambiaban su geometría, como se muestra en la [Figura 6.1.22](#).

Es importante destacar que las concentraciones de vapor de agua determinadas experimentalmente tienden a ser mayores que las calculadas, y en la mayoría de los casos se encuentran dentro de la incertidumbre experimental  $\sim 20\%$ . Esta incertidumbre está parcialmente relacionada con las limitaciones en la aplicación de la técnica de deconvolución del tipo "onion peeling". Sin embargo, a pesar de esta incertidumbre, este ejemplo demuestra la capacidad de determinar valores escalares, como las concentraciones de especies gaseosas, en un flujo reactivo con un movimiento fluido complejo.

Cabe destacar que este enfoque descrito puede aplicarse para determinar la concentración de otras especies gaseosas mediante el uso de filtros de banda estrecha que se adapten a las emisiones de cada especie gaseosa en particular.

Enfoques adicionales se han utilizado para determinar tanto las concentraciones de especies gaseosas como las temperaturas mediante el uso de técnicas de convolución aplicadas a múltiples mediciones de intensidad espectral. En el caso de flujos no reactivos, Gross y sus colegas llevaron a cabo un estudio para determinar la temperatura y concentración de los productos de escape ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HCl}$  y  $\text{CO}$ ) de una central eléctrica de carbón.

**Tabla 6.1.2: Comparación entre las concentraciones medidas y calculadas de los productos de combustión de una planta de generación eléctrica basada en carbón. [27]**

Species	Derived from $I_\lambda$	<i>in-situ</i> measurements	units
$\text{CO}_2$	8.64	9.4	%
$\text{H}_2\text{O}$	5.31	–	%
$\text{SO}_2$	380	383	ppm
NO	104	119 ( $\text{NO}_x$ )	ppm
HCl	95.2	–	ppm
CO	14.7	–	ppm

Se utilizaron medidas de intensidad espectral tomadas mediante un Espectrómetro de Transformada de Fourier por Interferometría (IFTS), que se detallan en la [Figura 6.1.21](#). Estas mediciones se realizaron a una distancia de 595 m de la chimenea de escape, que tenía un diámetro interior de 4,2 m. Las concentraciones de los valores escalares se determinaron mediante el ajuste de los valores medidos

y modelados, utilizando la base de datos HITRAN. Las mediciones in situ y los valores escalares obtenidos después de la deconvolución generalmente coinciden en un margen máximo de entre el 5% y el 10%, con una coincidencia de las concentraciones de SO<sub>2</sub> dentro de un margen del 1%.

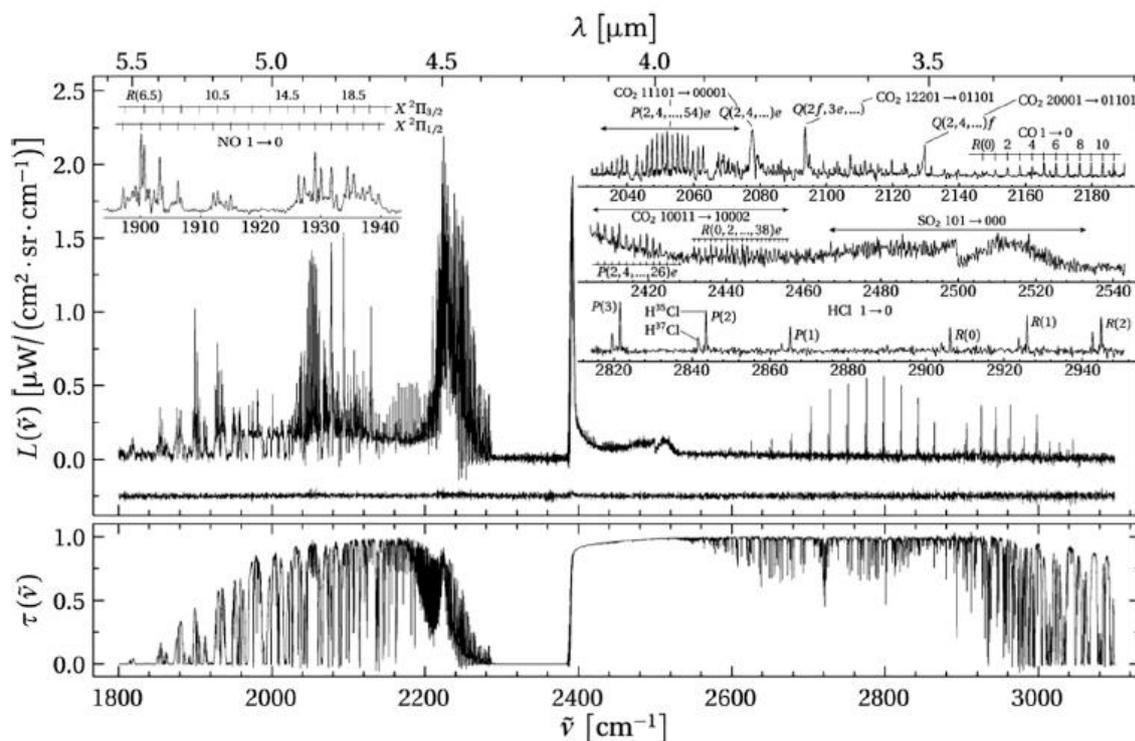


Figura 6.1.21: Emisiones de radiación promediadas en el tiempo de un penacho de escape tomadas mediante un IFTS. [27]

A menor escala, Rodríguez Conejo y Meléndez determinaron la densidad de una columna de CO<sub>2</sub> y la temperatura de los gases de escape de automóviles por medio mediciones de intensidad espectral. Se registraron temperaturas cercanas a 450 K con densidades de columna de aproximadamente 5000 ppm-m.

En resumen, los casos analizados demuestran la capacidad de determinar la concentración y distribución de gases tanto a cortas distancias (centímetros a metros) como a largas distancias (metros a kilómetros).

Los enfoques presentados para determinar múltiples valores escalares también pueden aplicarse a flujos reactivos. Esto se evidencia en el trabajo realizado por Gross y sus colegas, quienes determinaron las temperaturas y concentraciones de CO, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O en la llama de un quemador “Hencken”.

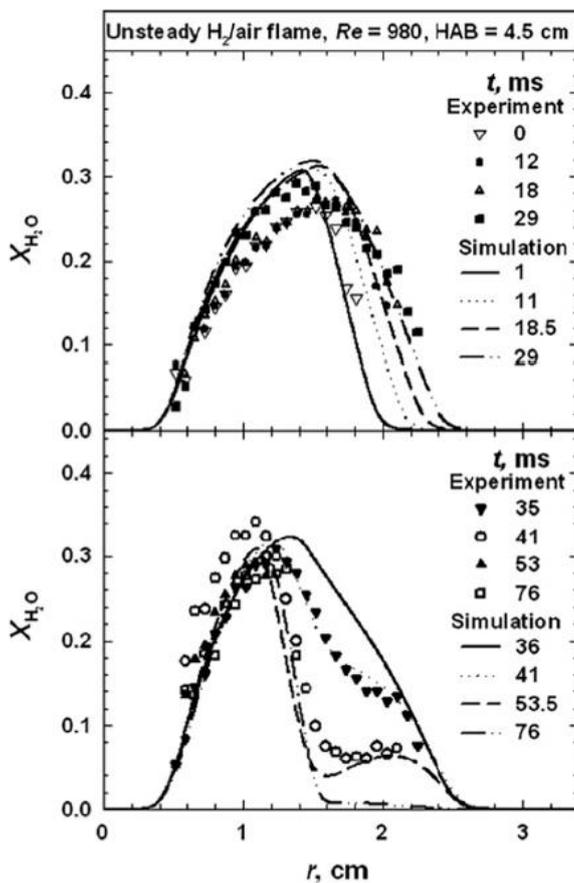


Figura 6.1.22: Magnitud de la concentración de vapor de agua determinada de forma experimental en comparación a la simulada en un software. [27]

En el estudio realizado, se encontró que la temperatura máxima medida en la llama ( $2319 \pm 19 \text{ K}$ ) coincidía con los valores determinados mediante cálculos de equilibrio químico ( $2398 \text{ K}$ ) y mediciones mediante laser de absorción ( $2348 \pm 115 \text{ K}$ ). Las concentraciones de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  cerca de la base de la llama coincidieron en gran medida con los cálculos de equilibrio, con diferencias del 4,1%, 9,9% y 12,8%, respectivamente. Los mapas de la distribución de temperatura y de las densidades de columna de las fracciones molares se presentan en la Figura 6.1.23. Los datos se recopilieron utilizando una disposición similar a la mostrada en la Figura 6.1.10 (a).

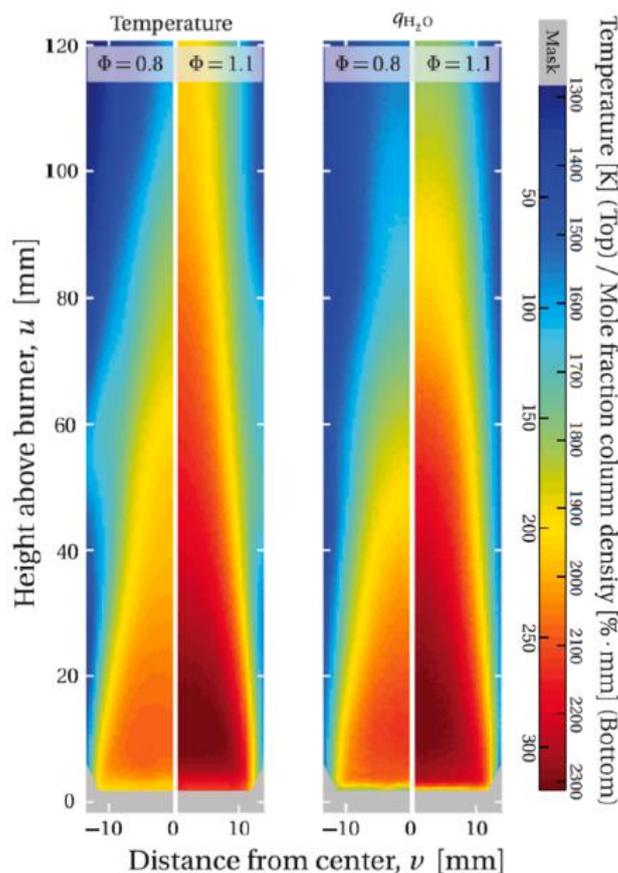


Figura 6.1.23: Temperatura y concentración de vapor de una llama formada por un quemador “Hecken”. [27]

Sin embargo, este enfoque presenta dos limitaciones. En primer lugar, requiere que la llama esté en estado estacionario, ya que la frecuencia de muestreo utilizada para medir los espectros es relativamente baja (del orden de Hz). En segundo lugar, se asume que los valores escalares son constantes a lo largo de una línea de visión.

A pesar de estas limitaciones, los valores escalares resueltos espacialmente y determinados mediante termografía infrarroja pueden proporcionar información valiosa sobre la cinética química y los procesos de transporte.

Se ha utilizado la técnica de termografía infrarroja para analizar la evolución temporal de las temperaturas y las densidades de columna de CO y CO<sub>2</sub> en penachos de combustión cerca de objetivos de grafito irradiados con láser. La Figura 6.1.24 muestra mapas de valores escalares en los penachos, los cuales han sido resueltos espacialmente. La superficie irradiada del grafito se toma como origen

del eje x, y los valores de intensidad espectral se presentan en una vista perpendicular a dicha superficie. Se observó que las temperaturas máximas en el penacho (alrededor de 3000 K) eran considerablemente mayores que las temperaturas en la superficie (aproximadamente 2500 K). Además, se evidenció una variación significativa en la distribución y las concentraciones máximas de CO y CO<sub>2</sub>.

El análisis de los resultados obtenidos en la [Figura 6.1.24](#) reveló que las concentraciones de CO en los penachos estaban controladas por la producción de CO cerca de la superficie de grafito y su posterior difusión hacia el exterior. Por otro lado, las concentraciones de CO<sub>2</sub> estaban controladas por la producción de CO<sub>2</sub> en el penacho y su consumo cerca de la superficie de grafito.

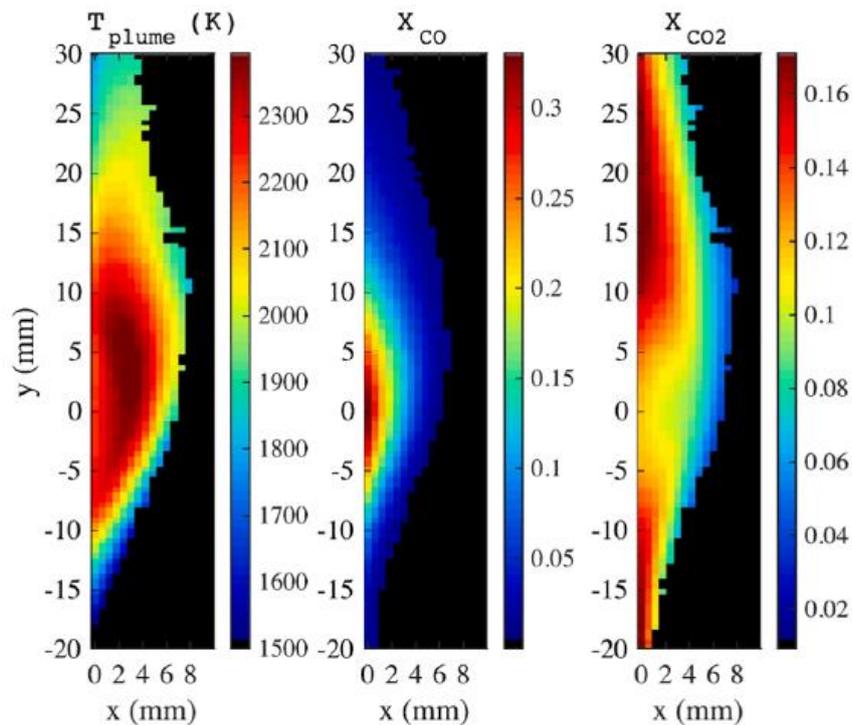
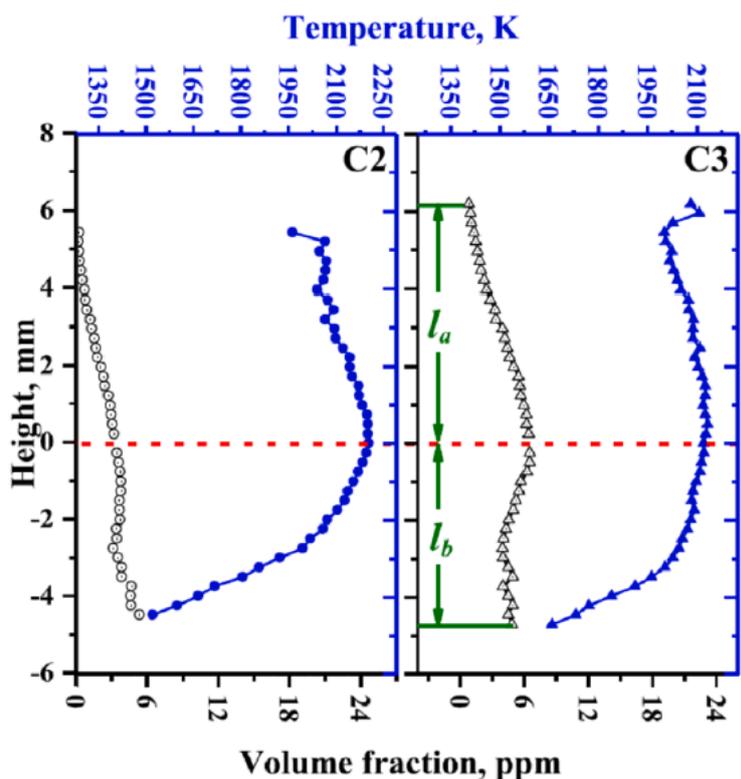


Figura 6.1.24: Temperatura y distribución de CO y CO<sub>2</sub> del flujo cercano a un objetivo de grafito irradiado por láser. [27]

La termografía infrarroja ha demostrado ser una herramienta efectiva para evaluar las concentraciones de partículas como el hollín mediante técnicas inversas. A través de mediciones de intensidad espectral, se ha logrado determinar las fracciones de volumen de hollín asociadas a partículas de carbón en combustión. Además, se ha utilizado la pirometría a dos colores para determinar la temperatura del hollín. Las fracciones volumétricas de hollín obtenidas (en el rango de 0 a 60 ppm) coincidieron con

los valores informados por otros investigadores. La [Figura 6.1.25](#) muestra las temperaturas y las fracciones de volumen de hollín obtenidas en el estudio, destacando que el tipo de carbón quemado, en este caso, bituminoso, influyó tanto en la concentración de hollín como en la distribución de la nube de hollín.



[Figura 6.1.25](#): Distribución de Temperatura y fracción volumétrica del hollín. [27]

Sin embargo, es importante tener en cuenta las limitaciones asociadas con la técnica de termografía infrarroja. Es necesario contar con flujos estables y una distribución uniforme de las especies para poder determinar valores escalares a partir de mediciones de intensidad espectral. Para superar estas limitaciones, se han aplicado técnicas de deconvolución a las mediciones de intensidad espectral promediadas en el tiempo. Este enfoque se ha utilizado para determinar distribuciones de temperaturas en dos dimensiones, así como la concentración de vapor de agua en una llama laminar no estacionaria de  $H_2$ .

El proceso de deconvolución consiste en calcular las intensidades espectrales promediadas en el tiempo a partir del registro de la frecuencia característica de fluctuación de la llama. Mediante esta técnica, se logró determinar la temperatura y la distribución del vapor de agua dentro de la llama. La [Figura 6.1.26](#)

presenta una comparación entre los valores simulados y los obtenidos tras la deconvolución (valores derivados). En general, se observa que las temperaturas derivadas y simuladas coinciden tanto en magnitud como en distribución. Sin embargo, se observó que las distribuciones de temperatura máxima fueron subestimadas en comparación con los valores simulados. Para mejorar la concordancia entre los valores derivados y los simulados, se sugiere adquirir múltiples mediciones de intensidad espectral a frecuencias de muestreo mayores, lo que evitaría la necesidad de promediar la fase de las mediciones.

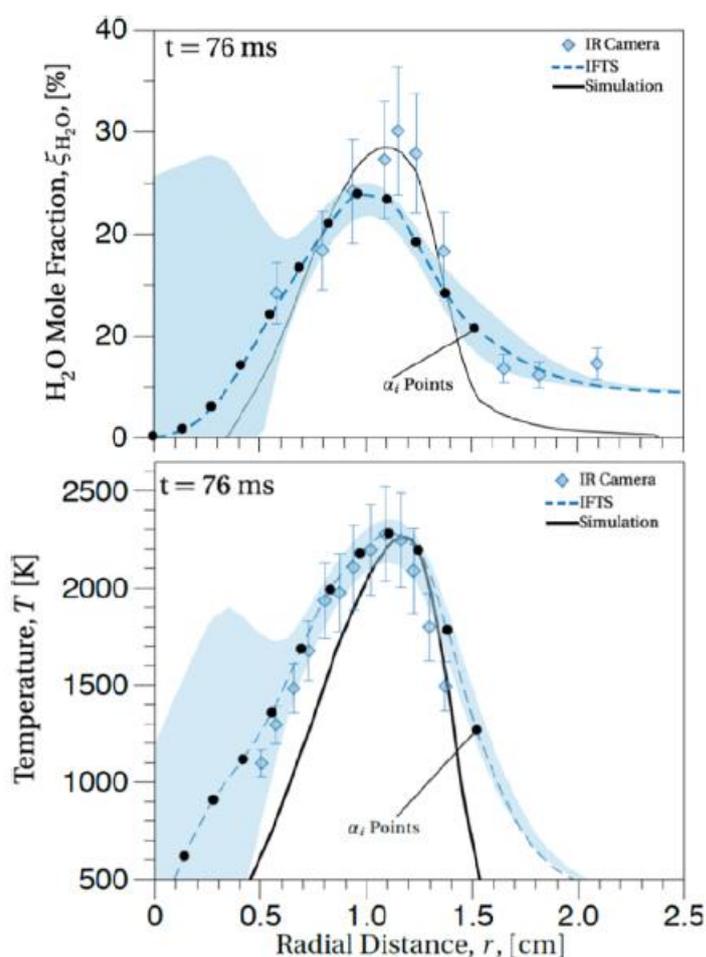


Figura 6.1.26: Perfil de temperaturas y fracción molar de vapor de agua de una llama de H<sub>2</sub> no estacionaria. [27]

Es útil contrastar brevemente la termografía infrarroja con otras técnicas de medición no intrusivas que se utilizan para determinar valores escalares en flujos. Algunas de estas técnicas incluyen CARS (Espectroscopía Raman Coherente Anti-Stokes), PLIF (Fluorescencia Inducida por Láser) de dos colores y técnicas de absorción láser. A continuación, se presentan algunas comparaciones:

- **Incertidumbres y resolución:** En general, las técnicas láser mencionadas tienen menores incertidumbres y una mayor resolución en comparación con la termografía infrarroja. Estas técnicas láser pueden proporcionar mediciones más precisas y detalladas de las distribuciones de temperatura y especies en los flujos.
- **Mediciones locales:** A diferencia de la termografía infrarroja, que brinda valores promediados de intensidad, los diagnósticos láser pueden proporcionar mediciones de temperatura y especies en ubicaciones locales específicas dentro del flujo. Esto permite una mayor precisión en la caracterización de gradientes y variaciones espaciales.
- **Limitaciones de escala y entorno:** Los diagnósticos láser tienen limitaciones en cuanto a las escalas de longitud y los entornos en los que pueden aplicarse. Algunas técnicas láser son más adecuadas para mediciones en flujos en laboratorios o ambientes controlados, y pueden no ser viables en aplicaciones de campo o en entornos industriales complejos.

### 6.1.3 EVALUACIÓN DE LAS SIMULACIONES

La termografía infrarroja puede utilizarse para evaluar las simulaciones mediante comparaciones cualitativas de dos formas:

- Comparando cuantitativamente las intensidades medidas y las calculadas.
- Analizando los valores escalares calculados y derivados.

En primer lugar, las imágenes infrarrojas proporcionan una visión cualitativa de la estructura de los flujos, lo que puede ser útil para guiar el desarrollo de modelos computacionales. Por ejemplo, en una simulación de la combustión de mezclas AP/HTPB, las imágenes infrarrojas revelaron la presencia de dos zonas de reacción que no fueron captadas por la simulación. Esta discrepancia condujo a un análisis más detallado del modelo y a una comparación cualitativa con las mediciones. Como resultado, se identificó la necesidad de incluir reacciones adicionales en el modelo debido a las diferencias entre los resultados simulados y medidos.

En segundo lugar, las comparaciones cuantitativas de las intensidades medidas pueden utilizarse para evaluar los cálculos bidimensionales y tridimensionales de los flujos. Por ejemplo, en el caso de un chorro de gas que se mezclaba con el aire circundante, se realizaron simulaciones y se calcularon los valores escalares que se utilizaron como entradas en un modelo de radiación. Inicialmente, los cálculos

bidimensionales mostraron diferencias significativas entre las intensidades de radiación medidas y calculadas. Esto motivó la realización de cálculos tridimensionales, que en promedio capturaron valores más cercanos a las mediciones. Se encontró que los fenómenos de arrastre y la vorticidad no se representaron adecuadamente en el modelo bidimensional, lo que resultó en valores de intensidad de radiación sobreestimados.

Rankin y sus colegas realizaron mediciones y cálculos de la intensidad de radiación emitida por diferentes tipos de llamas (Figura 6.1.27). En el caso de llamas de difusión de etileno, tanto laminares como inestables, encontraron que el movimiento de los fluidos a gran escala se podía predecir con el modelo matemático simulado. Además, observaron una similitud entre las intensidades de radiación pico medidas y calculadas, lo que sugiere que los valores de los cálculos, tanto escalares como de temperatura máxima, son similares a los valores reales. La diferencia más destacable entre las intensidades de radiación calculadas y las medidas se observó entre  $0 \leq z \leq 5$  mm (zona situada justo encima del quemador), donde la intensidad de radiación calculada es superior a la medida. Esto indica que la temperatura o la concentración escalar de la especie gaseosa en esta región se predice en exceso, hecho atribuible a las deficiencias en las pérdidas de calor modeladas, pues el modelo suponía una frontera adiabática entre el flujo y el medio externo.

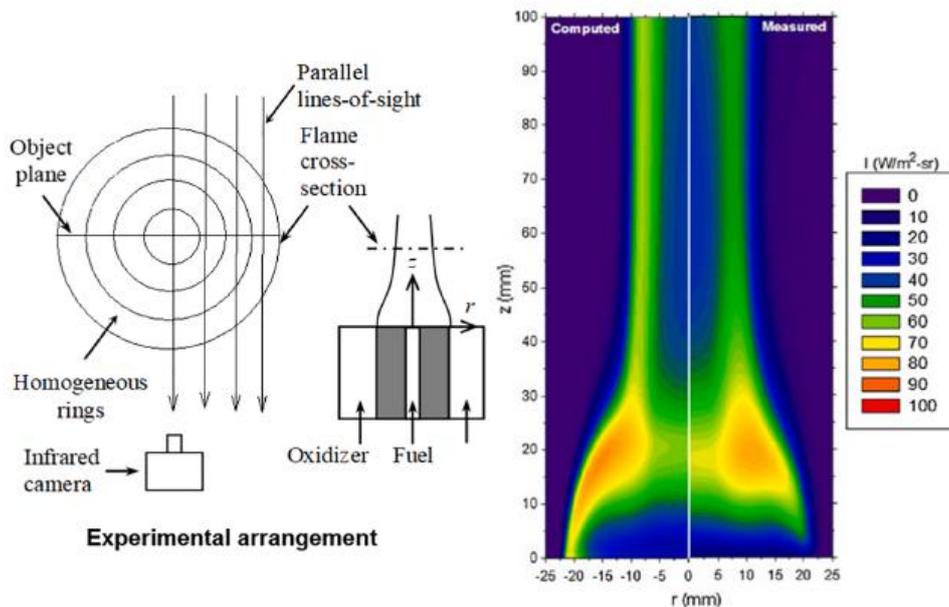


Figura 6.1.27: Disposición experimental, Intensidad de radiación calculada e Intensidad de radiación medida emitida por una llama laminar de etileno estabilizada en cuerpo de farol. [27]

En otro estudio realizado por Newale y sus colegas, calcularon y midieron la intensidad de radiación emitida por una llama de difusión turbulenta de metano, tanto con impacto en una placa como sin impacto. Utilizaron el simulador de dinámica de fuego "Fire Dynamics Simulator" para calcular la distribución de escalares, que luego se utilizó como entrada para resolver la Ecuación de Transferencia Radiativa (ETR). Las comparaciones entre los valores medidos y calculados (Figura 6.1.28) indicaron que las fluctuaciones generales de las llamas se podían apreciar en el modelo calculado. Sin embargo, encontraron discrepancias en los espesores de la capa límite entre las mediciones y los cálculos, lo que sugiere que el modelo no reflejaba adecuadamente los fenómenos físicos de la región. Por lo tanto, se concluyó que era necesario revisar y modificar el modelo para que se ajuste de manera más precisa a la realidad.

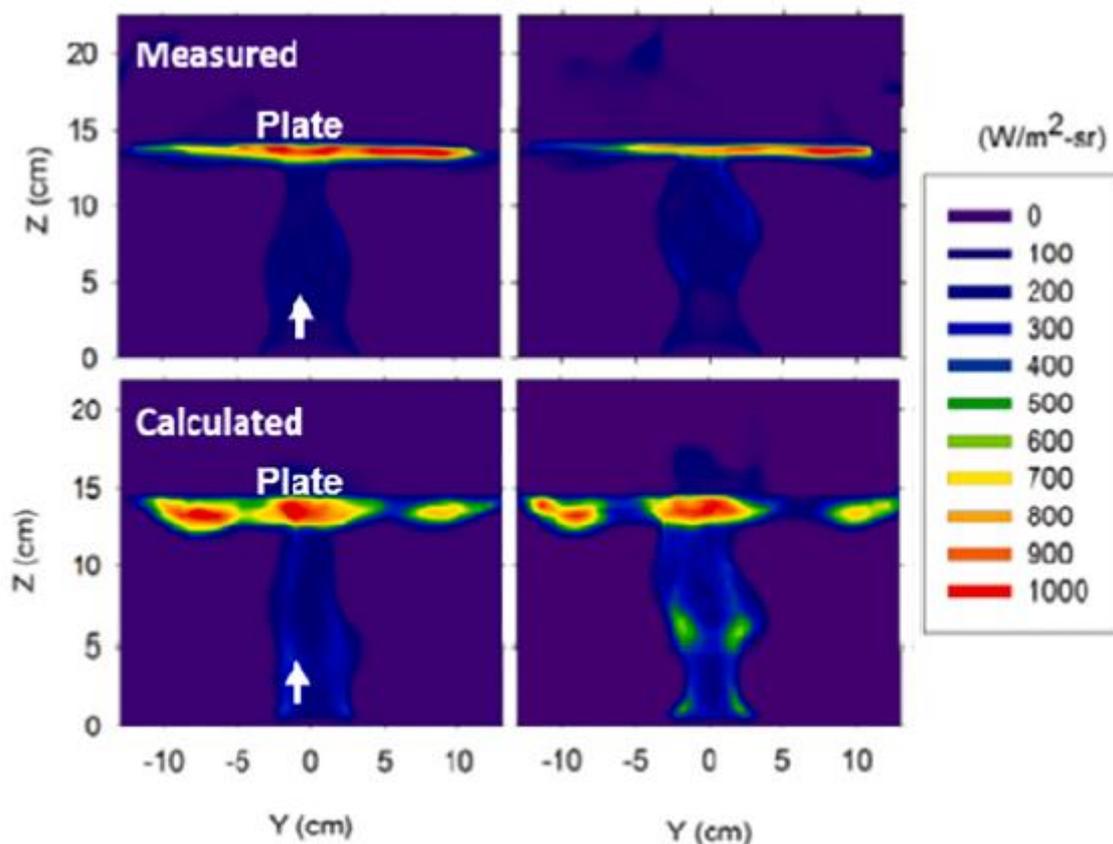


Figura 6.1.28: Intensidad de radiación medida (paneles superiores) y calculada (paneles inferiores) intensidad de la radiación emitida por una llama turbulenta de difusión flotante que incide sobre una placa plana. [27]

En un trabajo relacionado, Rankin y compañía calcularon y midieron la intensidad de la radiación emitida por una llama de un chorro turbulento no premezclado ( $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{N}_2$ ). Utilizaron filtros de paso de banda para aislar la radiación emitida por la llama del vapor de agua y del  $\text{CO}_2$  del aire. Las comparaciones entre los cálculos y las mediciones (Figura 6.1.29), considerando las pérdidas de radiación, mostraron discrepancias significativas, especialmente en la región aguas abajo de la punta de la llama. Esto demostró la importancia de tener en cuenta las pérdidas de calor por radiación en los cálculos para lograr una mayor precisión del modelo, especialmente en llamas con emisión de radiación baja.

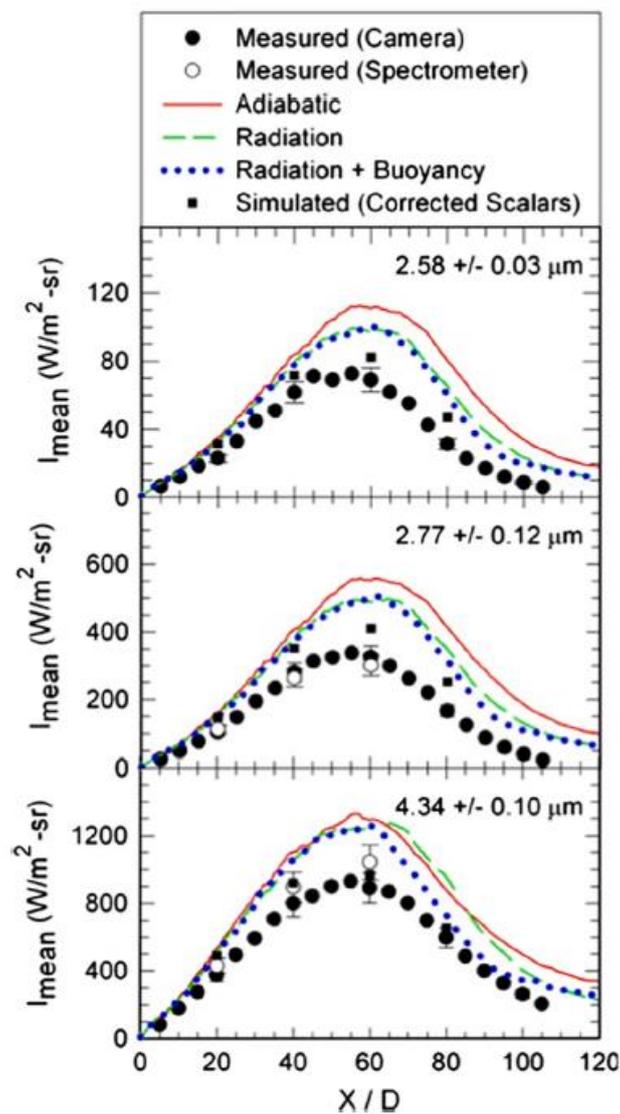


Figura 6.1.29: Valores medidos y calculados de las intensidades de radiación para una llama de  $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{N}_2$ . [27]

La termografía infrarroja también se ha utilizado para evaluar las simulaciones de penachos de escape reactivos, bastante complejos de estudiar con otras técnicas de medición. La Figura 6.1.30 muestra, como se ha usado esta técnica para medir las emisiones de radiación de un penacho de escape reactivo a la salida de la tobera de un cohete de propulsante sólido.

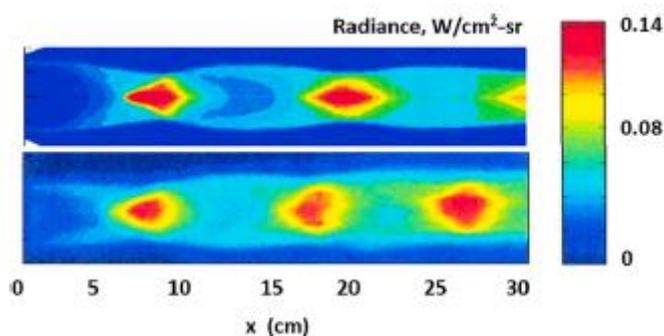


Figura 6.1.30: Comparación de las emisiones de radiación simuladas (panel inferior) y medidas (panel superior) de un penacho de escape de un cohete con tobera subexpandida. [27]

Por ejemplo, se ha utilizado esta técnica para medir las emisiones de radiación de un penacho de escape reactivo en la salida de la tobera de un cohete de propulsante sólido. Las mediciones se realizaron utilizando una cámara de infrarrojos con un filtro de paso de banda de 4,527-4,615  $\mu\text{m}$ , mientras que las simulaciones se llevaron a cabo resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds para determinar los valores escalares y utilizando un modelo estadístico de banda estrecha para resolver la intensidad de radiación. La comparación entre los valores medidos y los simulados revela algunas conclusiones importantes.

A la luz de los ejemplos expuestos, cabe destacar algunas limitaciones y consideraciones al utilizar la termografía infrarroja para evaluar cálculos:

- La concordancia entre los valores de intensidad medidos y calculados no garantiza necesariamente que los valores escalares calculados coincidan con los valores físicos reales, ya que las emisiones de radiación están estrechamente relacionadas con la trayectoria del flujo. Múltiples distribuciones de temperatura y especies a lo largo de una misma trayectoria pueden dar lugar a una intensidad de radiación emitida similar, lo que significa que puede haber múltiples distribuciones escalares posibles que se ajusten a los resultados medidos.

- Por otro lado, el desacuerdo entre las intensidades medidas y calculadas indica la existencia de una discrepancia entre los valores escalares calculados y los valores físicos reales. En estas situaciones, puede resultar difícil identificar qué valores escalares específicos están causando las discrepancias. Para abordar esto, es común realizar un estudio de sensibilidad de los valores escalares calculados o utilizar métodos más rigurosos, como análisis de tipo bayesiano, para identificar qué valores escalares están generando las discrepancias.

La capacidad de calcular las intensidades de radiación a partir de los valores escalares y realizar análisis está limitada por la precisión de los datos de los coeficientes de emisión y absorción utilizados en el solucionador RTE (Radiative Transfer Equation). Por lo tanto, es importante tener en cuenta estas limitaciones al interpretar y evaluar los resultados de las simulaciones mediante termografía infrarroja.

#### 6.1.4 ANÁLISIS DE FLUJOS CON APLICACIONES PRÁCTICAS

Esta sección ilustra la aplicación de la termografía infrarroja para proporcionar información sobre las interacciones del flujo dentro y desde dispositivos reales. Por ejemplo, Ombrello y compañía midieron las emisiones de  $I$  durante durante la ignición y la combustión en el interior de cámara de combustión de un “scramjet”. Este entorno fue un reto para la aplicación de la termografía infrarroja ya que:

- a) Las emisiones del flujo se atenúan a través de la ventana.
- b) Las emisiones de radiación de la ventana (caliente) pueden enmascarar las emisiones del flujo.
- c) Las escalas de tiempo asociadas a la ignición son relativamente cortas (es decir, milisegundos).

Para contrarrestar lo anterior:

- a) Las emisiones de las ventanas se aislaron de las emisiones totales.
- b) Las ventanas se utilizaron durante el proceso de calibración para considerar la atenuación.
- c) Las mediciones se recogieron a frecuencias de muestreo relativamente altas ( $\sim 1$  kHz).

Utilizando una estrategia de ignición independiente, se introdujo flujo de escape de un detonador de pulsos en la misma cavidad. Se observó un aumento de las emisiones de radiación (y por tanto de temperatura) del penacho con las detonaciones sucesivas, modificando la propensión de cada detonación para encender el combustible.

En un trabajo relacionado, Bradley y compañía determinaron bidimensionalmente las distribuciones de temperatura y las distribuciones de CO<sub>2</sub> en los gases de escape que salen de un motor turborreactor utilizando mediciones de  $I_\lambda$  (recogidas mediante IFTS). Las distribuciones cambiaron a medida que el flujo de combustible al motor se redujo. Estos estudios son importantes porque ilustran la capacidad de determinar a distancia las temperaturas de los flujos transitorios.

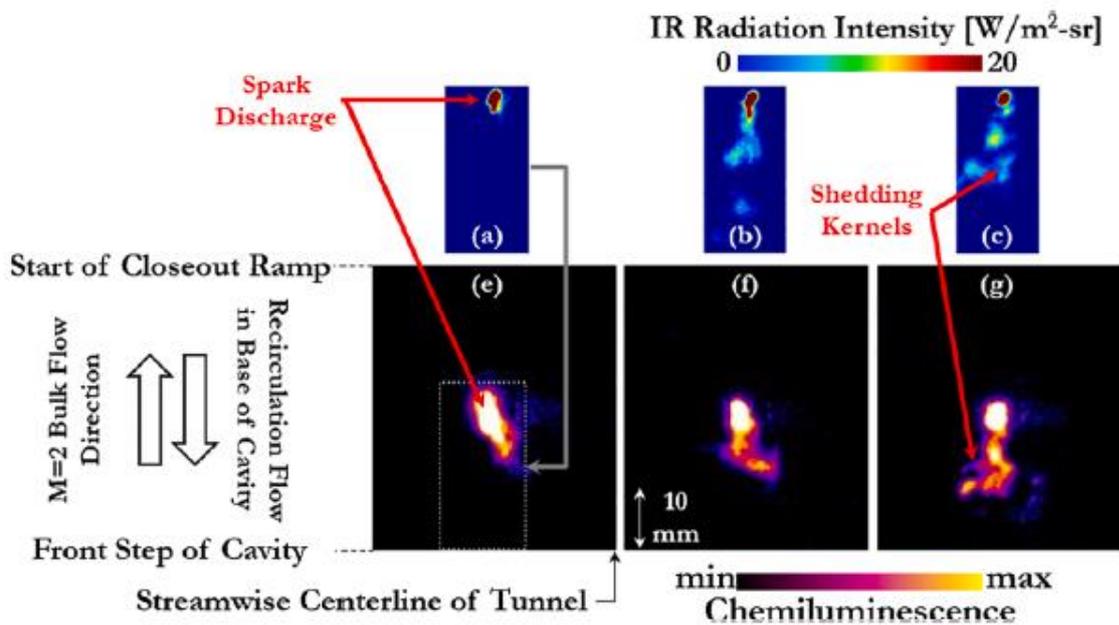


Figura 6.1.31: Chispas en proceso de ignición de una cámara de combustión *scramjet*. El panel superior corresponde a la emisión en el infrarrojo, mientras que el panel inferior corresponde a mediciones de quimioluminiscencia. [27]

#### 6.1.4.1 IDENTIFICACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN Y MEZCLA DE GASES

Squibb y su equipo llevaron a cabo mediciones de las emisiones de radiación visible e infrarroja del combustible y las llamas en un motor diésel utilizando cámaras de alta velocidad y cámaras infrarrojas. Las mediciones obtenidas con ambas cámaras se superpusieron y compararon en diferentes posiciones del cigüeñal. Las imágenes infrarrojas revelaron la distribución del vapor de combustible, mientras que las imágenes visibles mostraron la ubicación de los combustibles líquidos. Al combinar estas imágenes, junto con imágenes del proceso de ignición, se observó que la ignición tendía a ocurrir simultáneamente en varios lugares cerca del borde de la cámara de combustión, donde había vapor de

combustible en lugar de gotas de combustible. Según las mediciones, se teorizó que la ignición se producía cuando el vapor de combustible se mezclaba adecuadamente con el aire circundante y la temperatura superaba el umbral de ignición.

En otro trabajo relacionado, se utilizó un Espectrómetro de Transformada de Fourier de Imágenes (IFTS) para determinar la temperatura y la distribución del combustible dentro de la cavidad de un “scramjet”. Se tuvieron en cuenta las pérdidas de transmisión a través de las ventanas y las emisiones de radiación con y sin la presencia del combustible. Las distribuciones de temperatura y combustible en la cavidad se determinaron identificando las emisiones de radiación de los gases, aplicando técnicas inversas y suponiendo valores escalares uniformes a lo largo de la anchura de la cámara de combustión. La [Figura 6.1.32](#) muestra ejemplos de la temperatura y las fracciones molares de  $C_2H_4$  dentro de una cavidad para dos métodos de alimentación diferentes. Los valores de las fracciones molares determinados mediante el IFTS o FTIR coinciden dentro de la incertidumbre experimental. Las variaciones en la tasa de alimentación de combustible para la alimentación por inyección ascendente mostraron una respuesta no lineal en la concentración de combustible dentro de la cavidad. Esta información resulta útil para diseñar estrategias de encendido o evaluar los resultados del CFD.

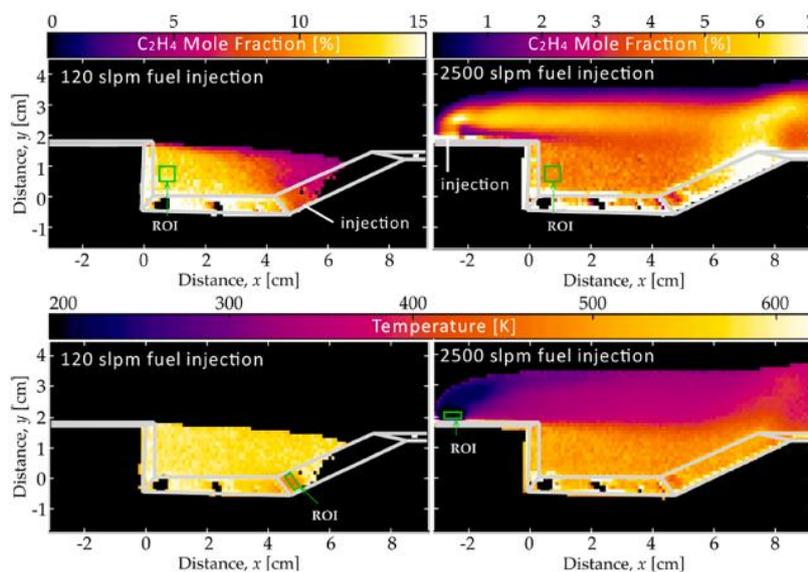


Figura 6.1.32: Distribución de combustible y temperatura dentro de la cavidad de una cámara de combustión “scramjet” determinada a partir de mediciones de intensidad espectral. Se utilizaron dos métodos de inyección de combustible: de cavidad (columna izquierda) y de flujo libre (columna derecha). [27]

### 6.1.4.2 MEDICIONES DE TEMPERATURA EFECTIVA

LA temperatura efectiva es la temperatura determinada a partir de mediciones infrarrojas suponiendo una distribución de Planck de las emisiones de las especies radiantes (es decir, despreciando la  $I_\lambda$ ). Estas mediciones son especialmente útiles cuando no es factible o práctico utilizar técnicas inversas para estimar las temperaturas físicas.

Levy y compañía tomaron las lecturas de las temperaturas efectivas del flujo de escape de una cámara de combustión alimentada con queroseno. Se observó una disminución de la temperatura con la distancia desde de la cámara de combustión debido al arrastre del aire circundante.

En un trabajo relacionado, Luneta y Blanchat determinaron la temperatura efectiva de llamas de metano a gran escala, con un diámetro de aproximadamente 73 metros. Se registraron picos de temperaturas constantes en el tiempo de 1150 °C a 1400 °C a diferentes alturas, hasta 50 metros, como se muestra en la [Figura 6.1.33](#). Estas mediciones proporcionan información sobre el comportamiento de la combustión en llamas de gran tamaño que son difíciles de estudiar debido a su escala relativamente grande.

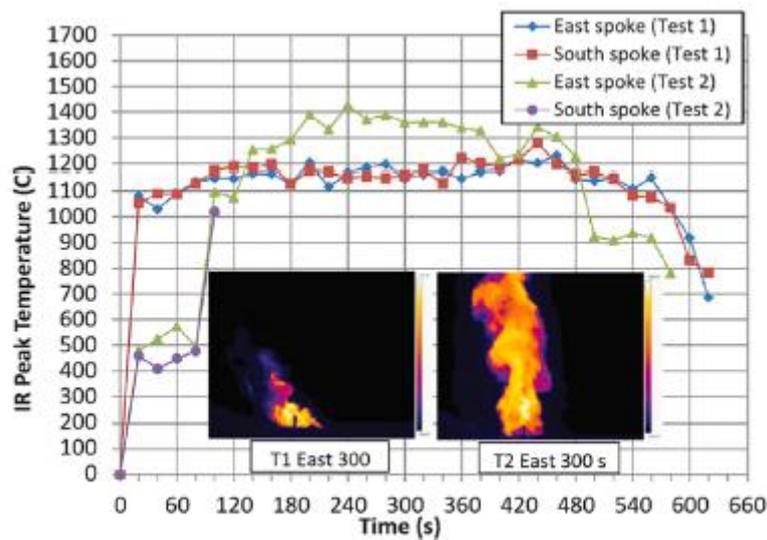


Figura 6.1.33: Temperaturas máximas aparentes durante la combustión a gran escala (~73 m) de metano. [27]

### 6.1.4.3 OBTENCIÓN DE IMAGENES CON FIBRA ÓPTICA

uso de fibra óptica que transmite en el infrarrojo puede facilitar la aplicación de la termografía infrarroja en dispositivos con acceso óptico limitado. Esto abre oportunidades para inspeccionar cámaras de combustión o motores donde el acceso visual directo es difícil.

Al acoplar haces de fibra óptica a una cámara infrarroja o hiperespectral, se pueden lograr varias aplicaciones importantes:

- Inspección de cámaras de combustión o motores con escaso acceso óptico: La fibra óptica permite llevar la radiación infrarroja desde lugares de difícil acceso hasta la cámara de la cámara infrarroja, lo que facilita la inspección de componentes internos y la detección de problemas en motores y cámaras de combustión.
- Identificación de la distribución de diferentes especies dentro del flujo: Al analizar las características de las emisiones de radiación en diferentes longitudes de onda, es posible identificar y mapear la distribución de diferentes especies químicas en el flujo, lo cual es crucial para comprender la combustión y optimizar el rendimiento de los sistemas.
- Medición de las características turbulentas del flujo: La termografía infrarroja, combinada con técnicas de análisis de imágenes, puede proporcionar información valiosa sobre las características turbulentas del flujo, como la velocidad y la turbulencia, lo que ayuda a mejorar la comprensión y el modelado de los flujos turbulentos.
- Evaluación de resultados del CFD: Al comparar las mediciones de temperatura obtenidas mediante termografía infrarroja con los resultados de simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), es posible evaluar y validar los resultados del CFD, lo que ayuda a mejorar la precisión de los modelos y las predicciones.
- Medición de las temperaturas de gas resueltas en el tiempo en un motor de detonación a pulsos: La termografía infrarroja puede utilizarse para medir las fluctuaciones de temperatura en tiempo real en motores de detonación a pulsos, lo que permite un monitoreo preciso de las condiciones de combustión y una mejor comprensión de los procesos de detonación.
- Determinación de las fluctuaciones de aire y combustible en los motores de combustión interna: Mediante la termografía infrarroja, es posible medir y analizar las fluctuaciones de temperatura

y concentración de aire y combustible en los motores de combustión interna, lo que proporciona información valiosa para el diseño y la optimización de los motores

- Medición de las temperaturas de las llamas en los motores Diesel: La termografía infrarroja se puede utilizar para medir y visualizar las temperaturas de las llamas en los motores Diesel, lo que ayuda a evaluar y optimizar la combustión y la eficiencia del motor.

#### 6.1.4.4 ACOPLAMIENTO DE TÉCNICAS LÁSER

El estudio realizado por Squibb, Zeng y sus colaboradores es muy relevante para comprender las características de los motores de combustión interna de encendido provocado. Al medir las emisiones de radiación visible e infrarroja de los combustibles y las llamas, junto con las mediciones de vectores de velocidad utilizando PIV, se obtuvo información valiosa sobre la relación entre el flujo turbulento, la variabilidad de la combustión y las emisiones de radiación (Figura 6.1.34).

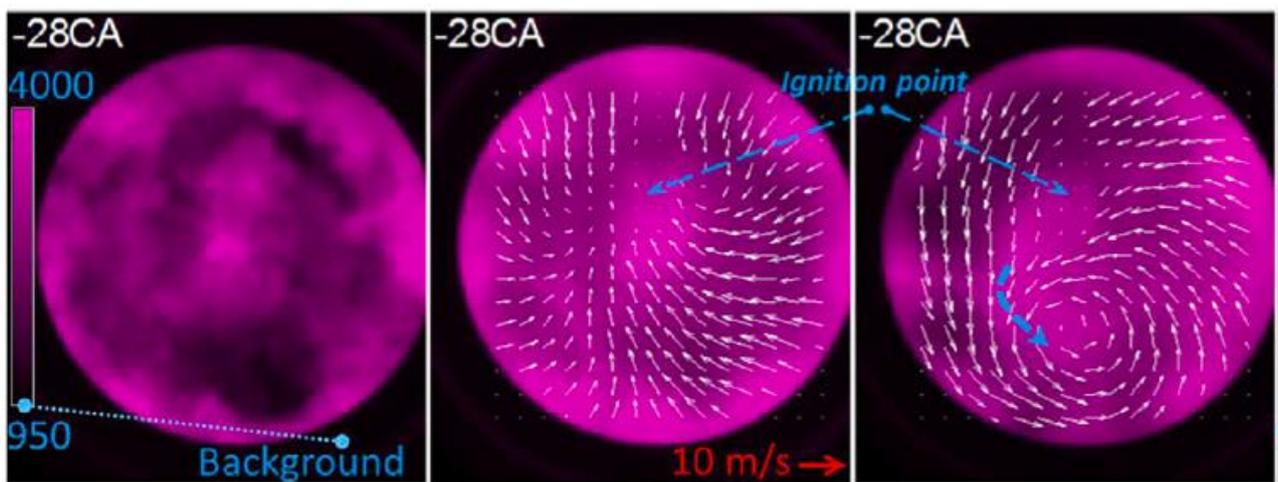


Figura 6.1.34: Emisiones de radiación infrarroja (rosa) del vapor de combustible superpuestas con vectores de velocidad recogidos mediante PIV dentro de un motor. Cada panel corresponde a un nivel diferente turbulencias. [27]

El análisis de las mediciones reveló que en condiciones de flujo turbulento, se observa una disminución en la variabilidad de la combustión, lo que indica una mayor estabilidad en el proceso de combustión. Sin embargo, este aumento en la estabilidad conlleva un aumento en las emisiones de radiación. Para comprender la causa de este aumento en las emisiones, se examinó la distribución asimétrica del combustible en el interior de la cubeta del pistón.

Las mediciones mostraron que las regiones donde las emisiones infrarrojas eran mayores indicaban una mayor concentración de vapor de combustible. Esto sugiere que las turbulencias en el flujo causan una distribución asimétrica del combustible, lo que a su vez afecta la combustión y las emisiones de radiación. Estos resultados son importantes para comprender y optimizar el proceso de combustión en motores de encendido provocado, lo que puede tener implicaciones significativas en términos de eficiencia y emisiones.

En conjunto, este estudio demuestra cómo la combinación de mediciones de emisiones de radiación y mediciones de vectores de velocidad puede proporcionar una comprensión más completa de los procesos de combustión en los motores de combustión interna. La termografía infrarroja desempeña un papel crucial en la caracterización de las emisiones de radiación y la identificación de las distribuciones asimétricas del combustible, lo que contribuye a mejorar el diseño y la eficiencia de estos motores.

La termografía infrarroja puede combinarse con otros diagnósticos láser y técnicas de imagen para obtener una caracterización más completa de los flujos. Al acoplar imágenes infrarrojas con imágenes ultravioletas o técnicas láser como PLIF (Fluorescencia Inducida por Láser), dispersión de Mie y CARS (Espectroscopia Coherente Anti-Stokes Raman), se pueden obtener datos adicionales sobre la distribución de especies, la temperatura y otras propiedades del flujo.

- La PLIF es una técnica que utiliza fluoróforos para visualizar y medir la distribución de especies químicas en un flujo. Al combinar PLIF con la termografía infrarroja, se puede obtener información sobre la distribución espacial de especies químicas y su temperatura simultáneamente. Esto es especialmente útil en aplicaciones donde la distribución de especies está directamente relacionada con la temperatura, como en procesos de combustión.
- La dispersión de Mie es una técnica óptica que se utiliza para medir el tamaño y la distribución de partículas suspendidas en un flujo. Al combinarla con la termografía infrarroja, se puede obtener información sobre la distribución de partículas y su temperatura en el flujo. Esto es particularmente útil en aplicaciones donde las partículas tienen un impacto significativo en el comportamiento del flujo, como en aerosoles o procesos de pulverización.
- La técnica CARS utiliza la dispersión de la luz láser para obtener información sobre la composición química y la temperatura de un flujo. Al combinarla con la termografía infrarroja, se puede obtener una caracterización más completa de la distribución de especies y la

temperatura en el flujo. Esto es especialmente relevante en aplicaciones donde es crucial comprender la composición química y la temperatura para controlar y optimizar el proceso, como en la combustión y la mezcla de gases.

### 6.1.4.5 INTERACCIÓN SUPERFICIE-FLUJO

a termografía infrarroja puede ser utilizada para investigar las interacciones entre las temperaturas de la superficie y las características del flujo, incluso en procesos transitorios. El estudio de Singh y colaboradores sobre la evolución de la temperatura de la superficie de gotas de biodiésel y diésel es un ejemplo de esta aplicación (Figura 6.1.35).

Al medir la evolución de la temperatura de la superficie de las gotas y aislar las emisiones de radiación correspondientes, se pudo observar que los dos combustibles alcanzaban diferentes temperaturas. Esto demuestra el potencial de la termografía infrarroja para identificar las características del fluido y las temperaturas de la superficie.

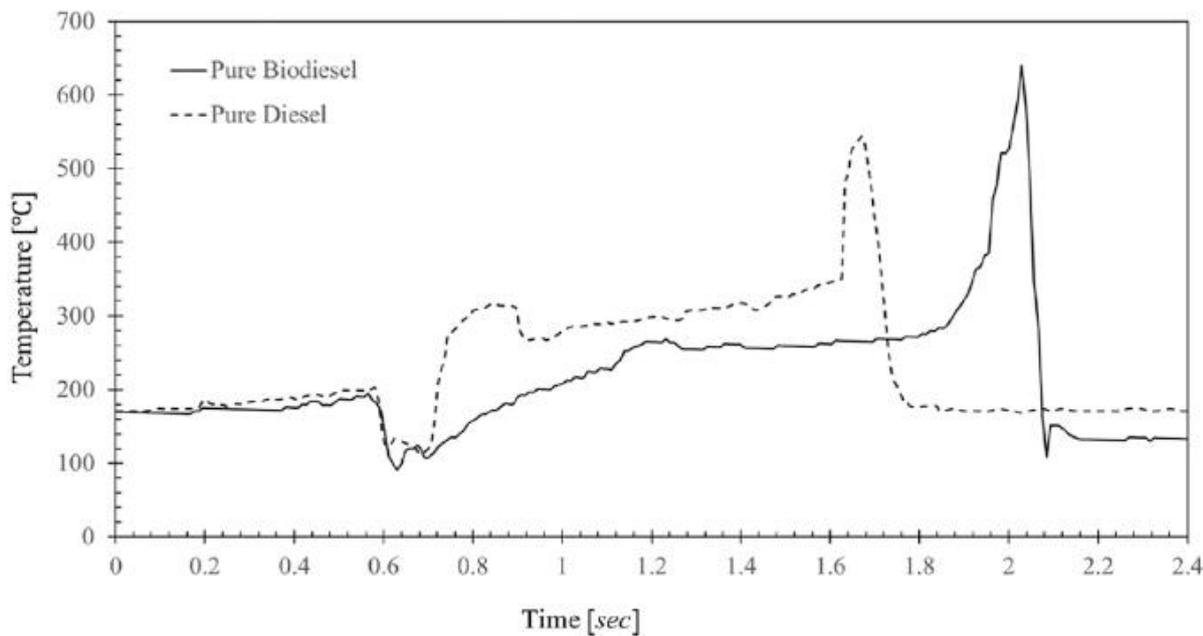


Figura 6.1.35: Evolución de la temperatura de la superficie de dos gotas de combustible durante la combustión ( $\epsilon = 1$ ). [27]

Además de este ejemplo, existen otras aplicaciones potenciales de la termografía infrarroja para investigar la interacción entre las temperaturas de la superficie y el flujo. Algunas de estas aplicaciones incluyen:

- Identificar los efectos de las pérdidas de calor de las superficies sobre la distribución y concentración de las especies químicas. La termografía infrarroja puede proporcionar información sobre cómo las temperaturas de la superficie afectan la reacción y la distribución de especies en los flujos.
- Determinar el papel de la transferencia de calor en las inestabilidades acústicas. Las variaciones en la temperatura de la superficie pueden influir en los fenómenos de inestabilidad acústica, y la termografía infrarroja puede ayudar a estudiar esta interacción.
- Cuantificar cómo la temperatura de la superficie afecta la velocidad de propagación de las llamas. La termografía infrarroja puede proporcionar datos sobre la temperatura de la superficie de las llamas y su relación con la propagación de la combustión.

#### 6.1.4.6 CÁLCULO DE CAMPOS DE VELOCIDADES, TEMPERATURAS Y CONCENTRACIONES

En trabajos relacionados, la termografía infrarroja se ha utilizado para determinar simultáneamente las temperaturas, concentraciones y campos de velocidad de partículas gaseosas en movimiento:

- **Campos de velocidades:** se pueden calcular si hay suficiente “seeding”, las partículas siguen el flujo y este es bidimensional.
- **Temperaturas:** son proporcionales o iguales a la temperatura del flujo y pueden determinarse si se conoce la  $\epsilon$  de las partículas o se mide la intensidad en dos  $I_\lambda$  simultáneamente.
- **Concentraciones de las especies:** se pueden determinar utilizando las temperaturas derivadas si se conocen las longitudes de las trayectorias y si las temperaturas y las concentraciones son uniformes a lo largo de las líneas de visión.

Una limitación del enfoque antes mencionado para evaluar las velocidades y temperaturas de los flujos es la suposición de que el campo fluido es uniforme (unidimensional). Esta limitación puede contrarrestarse ampliando las técnicas como la “termometría de fósforo”, en la cual se introducen partículas de fósforo en el flujo para posteriormente utilizar un haz láser plano para iluminarlas. El

desplazamiento de las partículas puede utilizarse para determinar el campo de velocidad, mientras que las mediciones de intensidad en dos espectros pueden utilizarse para determinar la temperatura de las partículas. Por ejemplo, en una mezcla de etanol y agua se ha podido determinar la concentración ambos compuestos irradiándolos con un haz laser, midiendo las emisiones de radiación y la absorción de la luz en diferentes longitudes de onda en el infrarrojo cercano.

#### 6.1.4.7 CÁLCULO DE VALORES ESCALARES

La aplicación del cálculo de valores escalares en función del tiempo en flujos turbulentos mediante termografía infrarroja presenta desafíos que deben abordarse para obtener mediciones precisas y representativas. A continuación, se describen dos retos importantes asociados a esta aplicación:

- **Obtención de mediciones tridimensionales de  $I_\lambda$ :** Para calcular los valores escalares en diferentes regiones del flujo, se requieren mediciones tridimensionales de la intensidad de radiación en múltiples longitudes de onda. Esto se puede lograr mediante el uso de un IFTS con barridos a frecuencias de muestreo relativamente altas. Se puede acoplar una rueda de filtros de banda estrecha a una cámara de infrarrojos para obtener las diferentes longitudes de onda necesarias. Es importante seleccionar los filtros adecuados, buscando un equilibrio entre la resolución espectral y la relación señal/ruido.
- **Extracción de valores escalares a partir de las mediciones de  $I$ :** En casos en los que los valores escalares varían a lo largo de las líneas de visión, es necesario desarrollar técnicas para extraer estos valores de las mediciones de intensidad de radiación. Si el flujo es simétrico, se pueden aplicar técnicas relativamente sencillas para esta extracción. Sin embargo, cuando el flujo es asimétrico, se deben recolectar medidas de intensidad de radiación desde varios ángulos diferentes utilizando un IFTS. Incluso con esta aproximación, solo se podrían determinar los valores escalares promedio y no su evolución en función del tiempo.

## 6.2 DETECCIÓN DE LA MORFOLOGÍA DE ELÉCTRODOS FLEXIBLES CONFORMADOS A PARTIR DE FABRICACIÓN ADITIVA

### 6.2.1 INTRODUCCIÓN

El papel industrial del electrodo flexible es crucial para el avance de la fabricación en masa de dispositivos electrónicos. El proceso de fabricación masiva de electrodos flexibles implica la deposición de tintas conductoras sobre sustratos flexibles mediante técnicas de impresión por chorro de tinta o serigrafía. No obstante, durante este proceso, es común que se presenten defectos morfológicos que afectan negativamente la calidad de los electrodos flexibles. Dichos defectos incluyen deformaciones y grietas causadas por flexiones repetidas, agujeros originados por burbujas de aire que estallan durante el curado y la sinterización, y la presencia de impurezas que se adhieren a los electrodos. Estos defectos afectan el rendimiento de los electrodos flexibles.

Existen métodos de detección morfológica, como el microscopio óptico (OM), el microscopio de escaneo de electrones (SEM), el microscopio de transmisión de electrones (TEM) y el microscopio de fuerza atómica (AFM), que son altamente eficaces para analizar la morfología microfísica de los electrodos flexibles. Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones, como un consumo de tiempo elevado, una capacidad limitada para analizar grandes áreas y un costo que no justifica su uso en la fabricación en masa de electrodos flexibles que no requieren una perfección a nivel de micras.

Por lo tanto, es urgente desarrollar un método de caracterización de defectos morfológicos que sea rápido y no destructivo. En este contexto, la termografía infrarroja ha adquirido un papel cada vez más relevante en la detección de diferentes fenómenos, como la corrosión en materiales de acero, la delaminación en materiales poliméricos y la resistencia térmica interfacial. En este artículo, se investiga el uso de la termografía infrarroja como técnica de detección de defectos morfológicos en electrodos flexibles, con el objetivo de determinar su idoneidad como método de control de calidad.

## 6.2.2 MATERIALES Y MÉTODOS

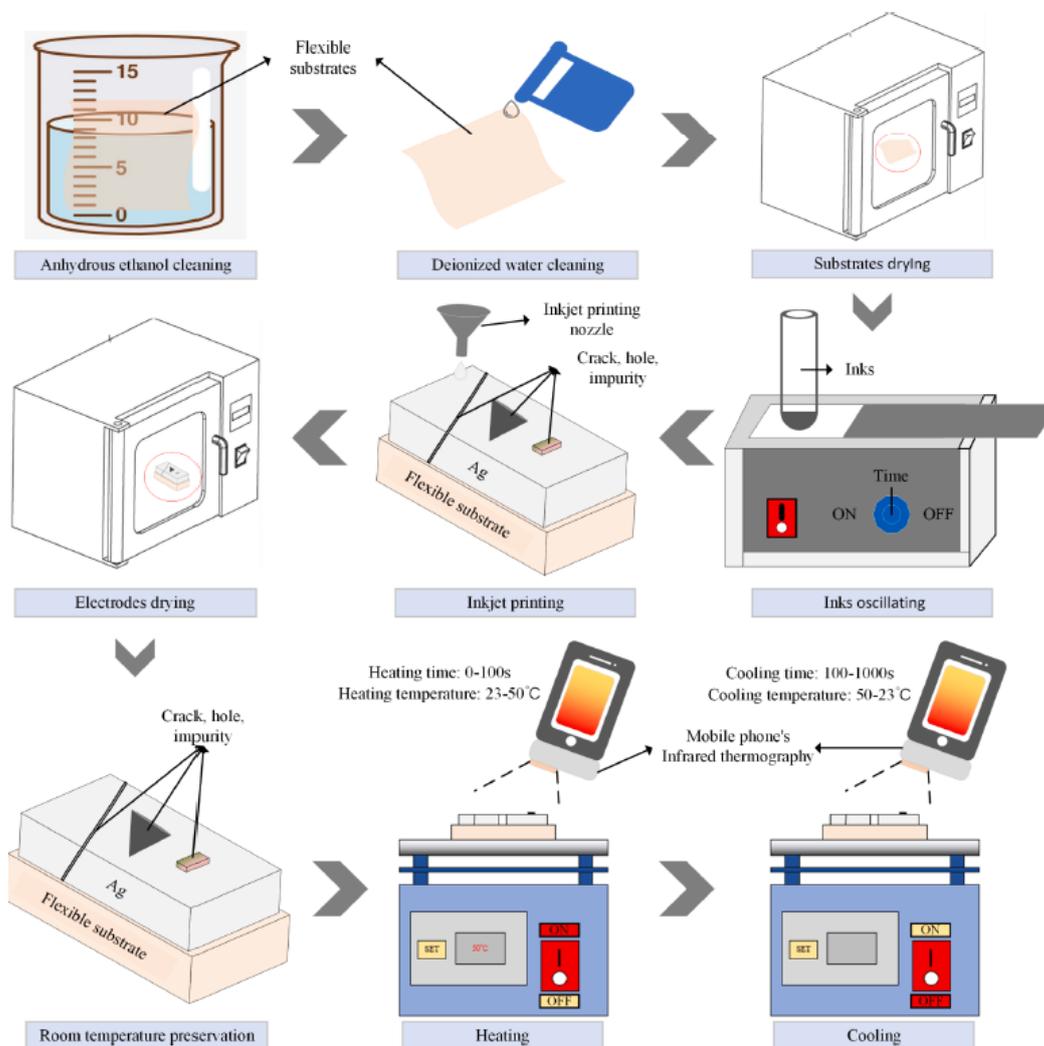


Figura 6.2.1: Proceso de detección de defectos de electrodos flexibles por medio de la termografía infrarroja. [28]

El esquema experimental se muestra [Figura 6.2.1](#):

- i. La tinta conductora de nanoplate (BroadCON-INK550) se agita uniformemente mediante ultrasonidos.
- ii. A continuación, se imprime un de chorro tinta en el sustrato de PET (PrintPlus C-PET), realizando un recocido a 150 °C durante 30 min.
- iii. Por último, los electrodos flexibles se calentaron de nuevo hasta casi 50 °C utilizando una placa calefactora a temperatura ambiente (23 °C).

El equipamiento usado fue:

- **Estereomicroscopio de zoom (SMZ680):** Para detección de la morfología inicial del electrodo.
- **Termografía infrarroja (Xtherm T3S, IRay Technology Co., ltd.):** Para para detectar los defectos morfológicos del electrodo flexible durante el proceso de calentamiento y enfriamiento.
- **Estación de trabajo electroquímica (CHI760E):** Para realizar “Espectroscopia de Impedancia Electroquímica” (EIS) de diferentes electrodos defectuosos.

Se muestran os parámetros básicos, como como la resolución, el paso de píxeles, la diferencia de temperatura equivalente al ruido (NETD) y la diferencia de temperatura mínima resoluble (MRTD) de la de la cámara termográfica de infrarrojos (Tabla 6.2.1).

Tabla 6.2.1: Parámetros básicos y prestaciones del generador de imágenes termográficas. [28]

Types	Resolution	Pixel pitch	Focal length
T3S	384 × 288	17um	13 mm
NETD	MRTD	Measuring range	Power dissipation
≤60mK	≤500mK	-20°C – +120°C (Extensible)	<500mW

Se seleccionaron los agujeros como los principales defectos a estudiar en los electrodos flexibles debido a que son más fáciles de reproducir en comparación con otras deformaciones, como las grietas y las impurezas. Durante el proceso de calentamiento, se registró la temperatura cada segundo. La velocidad de enfriamiento fue lenta debido a la temperatura residual de la placa calefactora

### 6.2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se imprimieron cinco electrodos cuadrados utilizando tinta conductora por chorro de tinta sobre un sustrato de PET. Los electrodos tenían un lado de "15 mm" de longitud. Cuatro de los electrodos presentaban defectos en forma de agujeros en el centro, con longitudes laterales de "1 mm, 2 mm, 3 mm y 4 mm", respectivamente, mientras que el quinto electrodo se consideraba ideal, sin defectos.

Durante el proceso de recocido, los electrodos flexibles mostraron la formación de anillos, como se ilustra en la Figura 6.2.2 (a), debido a las diferentes velocidades de evaporación de la tinta en los bordes y el centro del electrodo (lo que resulta en la deposición de soluto en los bordes). Bajo el microscopio, las zonas defectuosas no presentaban una forma exactamente cuadrada, como se muestra en la Figura 6.2.2 (b). Esta falta de precisión puede atribuirse a la inexactitud en el proceso de impresión, la difusión de la tinta y las propiedades hidrofóbicas del sustrato. Aunque las imágenes microscópicas son capaces de detectar con precisión las zonas con defectos, el área de detección es limitada, lo que dificulta el análisis cuantitativo de defectos de mayor tamaño.

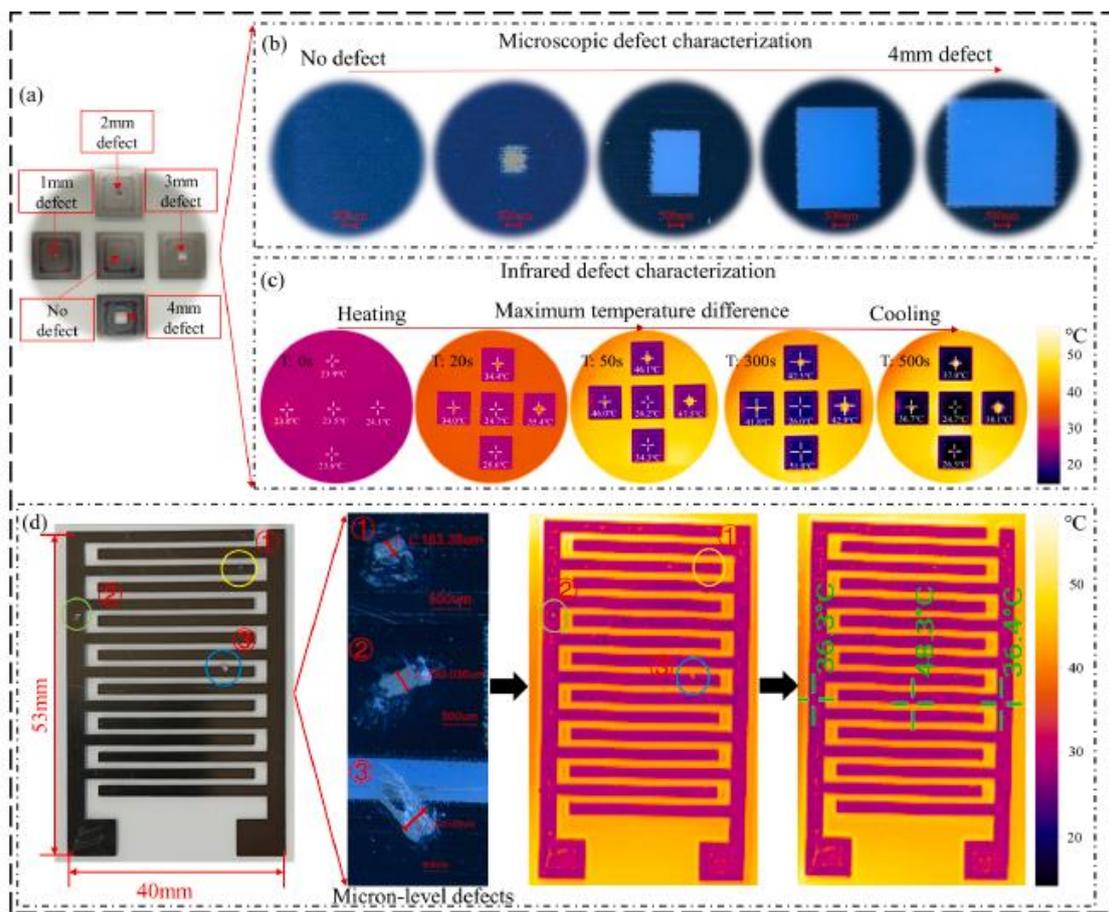


Figura 6.2.2: Análisis de detección de defectos característicos de electrodos flexibles impresos con tinta: (a) Defectos de diferentes tamaños en electrodo flexible. (b) Morfología microscópica de los defectos del electrodo flexible. (c) Imágenes térmicas infrarrojas de los defectos del electrodo flexible durante el proceso de calentamiento y enfriamiento. (d) Resultados de la detección termográfica por infrarrojos de los defectos del electrodo flexible. [28]

Se utilizó la termografía infrarroja para detectar los defectos de los agujeros en los electrodos flexibles, registrando la temperatura durante el calentamiento y el enfriamiento. En la [Figura 6.2.2 \(c\)](#), se puede observar que los defectos de los agujeros y los anillos de café en los electrodos flexibles se volvían más visibles a medida que aumentaba el tiempo de calentamiento, y gradualmente se atenuaban a medida que transcurría el tiempo de enfriamiento. Se encontró que las áreas defectuosas se calentaban más rápidamente y se enfriaban más lentamente en comparación con las zonas no defectuosas. Esto se debe a que las áreas cubiertas con nanoplata tienen una mayor capacidad de disipación de calor en comparación con las áreas aislantes del sustrato de PET. Es importante mencionar que las zonas anilladas estaban cubiertas con nanoplata, lo cual contribuye a una mayor disipación de calor en comparación con las zonas con defectos. Como resultado, los anillos se formaban más lentamente durante el proceso de calentamiento y desaparecían más rápidamente durante el proceso de enfriamiento.

En general, cuanto mayor sea el tamaño del defecto en los electrodos flexibles, mayor será la temperatura en la zona defectuosa durante el proceso de calentamiento y enfriamiento. [La Figura 6.2.3 \(a\) y \(b\)](#) muestra que la máxima temperatura y diferencia de temperatura se alcanzaron después de 50 segundos de calentamiento. Se observa que la temperatura en la zona con un defecto de 1 mm era más baja y se acercaba a la temperatura de la zona no defectuosa. Los microdefectos ocupaban un área pequeña en el electrodo, lo que resultaba en diferencias de temperatura insignificantes. Por otro lado, las zonas con defectos de mayor tamaño mostraron temperaturas más altas en comparación con las zonas no defectuosas.

Los espectros de impedancia electroquímica en la [Figura 6.2.3 \(c\)](#) revelan que la impedancia del electrodo era relativamente estable a diferentes frecuencias. Sin embargo, a medida que aumentaba el tamaño del defecto, la impedancia aumentaba de manera evidente. Esto se debe a que la presencia de defectos en el área de aislamiento del electrodo obstaculiza la señal de excitación de corriente alterna, lo que afecta la respuesta eléctrica del electrodo.

Se utilizó la máxima diferencia de temperatura para predecir las diferentes impedancias de los electrodos defectuosos a una frecuencia de 1 Hz, con un intervalo de confianza del 95%. Las predicciones mostraron una buena linealidad, como se muestra en la [Figura 6.2.3 \(d\)](#) ( $R^2 = 0,9887$ ).

Además, se seleccionó un electrodo interdigital flexible con tres defectos (siendo el defecto mínimo de  $183,38 \mu\text{m}$ ) para validar la técnica de caracterización propuesta, como se muestra en la [Figura 6.2.2](#)

(d). El defecto de menor tamaño pudo detectarse fácilmente a partir de la imagen térmica de infrarrojos. Además, en la imagen térmica se pudieron detectar más defectos microscópicos en la superficie del electrodo. No obstante, se puede utilizar un análisis numérico adicional para evaluar cuantitativamente los microdefectos y mejorar la precisión de la detección. Se observa que la presencia de nanoplata tiene un impacto significativo en la disipación del calor en los electrodos.

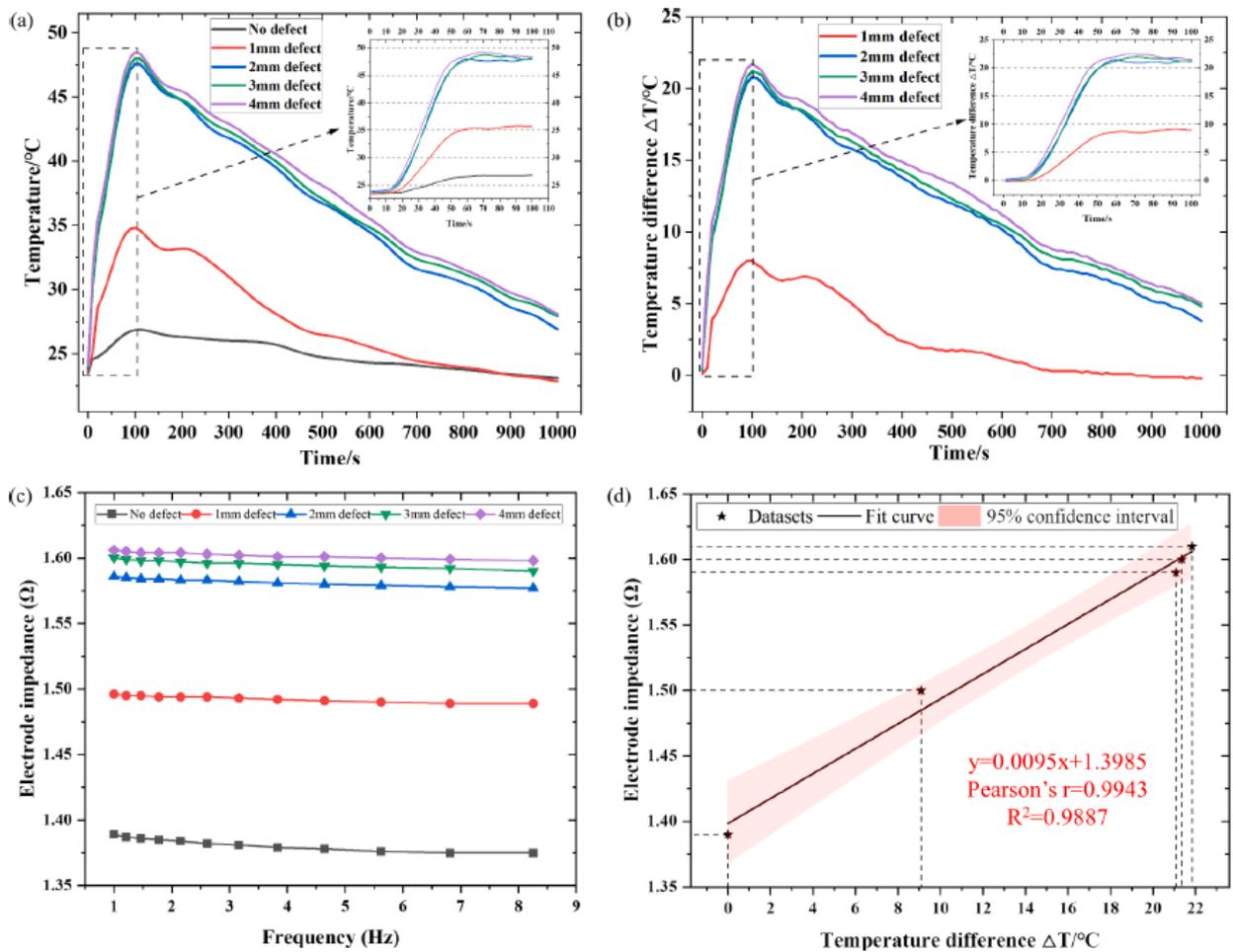


Figura 6.2.3: Análisis térmico y ajuste de resultados del rendimiento de un electrodo con diferentes defectos. (a), (b) Temperatura y diferencia de temperaturas entre áreas defectuosas y no defectuosas. (c) Espectroscopía de la impedancia electromecánica de los defectos de diferentes electrodos. (d) Predicción para diferentes impedancias de electrodos defectuosos. [28]

## 6.3 INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA SOBRE LA DETECCIÓN DE GRIETAS POR FATIGA EN PLACA METÁLICA MEDIANTE VIBRO-TERMOGRAFÍA.

### 6.3.1 INTRODUCCIÓN

La rotura por fatiga es un mecanismo común de fallo en las estructuras durante su uso, representando hasta el 80 % de los fallos en estructuras metálicas. Bajo cargas cíclicas, se forman grietas a partir de pequeños daños que no son visibles, como dislocaciones o microfisuras, las cuales se propagan gradualmente hasta hacerse visibles. Cuando la grieta alcanza un punto crítico, se propaga de manera inestable y conduce al fallo inmediato de las estructuras. Por lo tanto, es importante desarrollar métodos efectivos para detectar y controlar el crecimiento de las grietas producidas por fatiga.

Una técnica de análisis no destructiva es útil para detectar y medir la longitud y velocidad de propagación de las grietas causadas por fatiga, que son parámetros importantes en el análisis de la mecánica de la fractura. Los resultados de este análisis pueden ayudar a los responsables de la toma de decisiones a implementar las medidas adecuadas de seguridad y reducir los costes de inspección y reparación. Hasta ahora, se han desarrollado varias técnicas para detectar y evaluar estas grietas. La inspección visual es comúnmente utilizada para detectarlas y se mide su longitud con dispositivos de aumento. La técnica de emisión acústica (AE) se utiliza ampliamente en ingeniería civil para localizar las grietas, mediante la detección y registro de señales acústicas generadas por la formación de la grieta. Se han llegado a aplicar técnicas de ultrasonidos convencionales, lineales y no lineales, para supervisar las grietas de fatiga:

- **Técnica ultrasónica lineal:** localización y dimensionamiento de la grieta sencillos a través de la dispersión y atenuación de las ondas ultrasónicas.
- **Técnica ultrasónica no lineal:** localización y dimensionamiento de la grieta complejos a través armónicos elevados y subarmónicos, pese a tener una muy buena sensibilidad para la detección grietas a escala microscópica.

Por otro lado, la vibrotermografía es una técnica activa de termografía infrarroja utilizada para inspeccionar daños superficiales o subsuperficiales en estructuras, como grietas, corrosión, delaminación o daños por impacto. El calor se genera en una estructura vibrante a través de

mecanismos como la fricción, la deformación plástica y la viscoelasticidad del material. En el caso de la detección de grietas mediante vibrotermografía, el mecanismo dominante en la generación de calor es el rozamiento.

Existen alternativas para estimular la vibración mecánica de las muestras, como el uso de una bocina sónica que proporciona una potencia acústica de hasta 1 kW. Sin embargo, la generación no controlada de componentes de frecuencia y amplitud de la excitación puede llevar a resultados experimentales poco fiables. Para su aplicación en la industria, es necesario encontrar formas de reducir el consumo de energía sin comprometer la generación de calor suficiente para detectar los defectos.

Otra opción es la vibrotermografía con transductores PZT, que se basa en la alta eficiencia de resonancia de los defectos locales. Con una potencia de entrada baja, inferior a 1 W, se activan los defectos de modo que generen suficiente calor para ser detectados por una cámara de infrarrojos. Para mejorar el acoplamiento entre el actuador y la estructura, se utiliza un transductor de acoplamiento de aire, lo que permite que la vibrotermografía sea un método de ensayo no destructivo sin necesidad de contacto directo.

Hasta ahora, los trabajos anteriores se han centrado principalmente en la detección de la ubicación de los daños en las estructuras. Sin embargo, pocos investigadores han abordado la caracterización cuantitativa de los daños. El objetivo principal de este trabajo es detectar y medir cuantitativamente la longitud de las grietas utilizando la vibrotermografía.

En el presente experimento, se utilizó un transductor PZT para excitar una muestra con una grieta y se capturaron imágenes térmicas secuenciales con una cámara infrarroja. Posteriormente, se procesaron estas imágenes utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT) y se determinó la longitud de la grieta a partir de las imágenes de amplitud y fase. Finalmente, se realizó un análisis de elementos finitos tanto térmico como mecánico para simular la generación de calor en la superficie de la grieta y comprender mejor su mecanismo.

### 6.3.2 VIBROTERMOGRAFÍA

En el caso de una grieta, el movimiento relativo entre las superficies conduce a la generación de calor debido al contacto y la fricción. En la [Figura 6.3.1](#) se muestra que los puntos  $P_1$  y  $P_2$  forman un par de contacto en la superficie de la grieta, donde  $u_1$  y  $u_2$  son los desplazamientos de esos dos puntos a lo

largo del eje "y" cuando se aplica excitación ultrasónica. La ley de contacto de la superficie de la grieta se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{cases} \sigma_{n1} + \sigma_{n2} \geq 0 \text{ y } u_1 - u_2 - d \leq 0 \text{ (No hay contacto)} \\ \sigma_{n1} + \sigma_{n2} < 0 \text{ y } u_1 - u_2 - d > 0 \text{ (Contacto y fricción)} \end{cases} \quad (6.9)$$

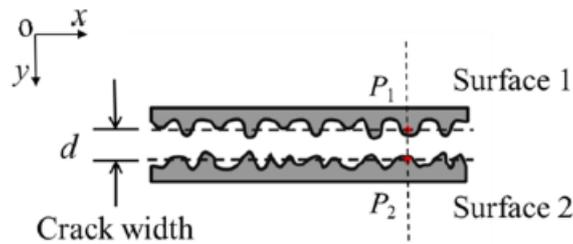


Figura 6.3.1: Diagrama esquemático de la ley de contacto para la superficie de una grieta. [29]

Cuando el desplazamiento relativo del par de contactos  $u_1 - u_2$  es mayor que la anchura de la grieta, la superficie de la grieta pasa del estado abierto al estado cerrado, y las tensiones de contacto normales y tangenciales dejan de ser nulas. Los ciclos de apertura y cierre de la grieta generan fricción por contacto, que se traduce en la generación de calor. El calor producido por la fricción puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$q(t) = [\mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-\eta|v_\tau(t)|}] \cdot \sigma_n(t) \cdot v_\tau(t) \quad (6.10)$$

Este aporte de calor hace que la temperatura local aumente en las superficies de la grieta, y se produce la conducción de calor de acuerdo con la ley de Fourier:

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q(t) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.11)$$

### 6.3.3 TRANSFORMADA DE FOURIER

La transformada de Fourier es una técnica de procesamiento de señales que permite transformar los datos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. En este estudio, se utiliza la transformada de Fourier para obtener las imágenes de amplitud y fase a partir de la secuencia térmica capturada

mediante vibrotermografía. La transformada discreta de Fourier unidimensional se puede expresar de la siguiente manera:

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) \exp\left(\frac{-j2\pi nk}{N}\right) = Re_n + jIm_n \quad (6.12)$$

$$f_n = n \cdot \frac{f_s}{N} = \frac{n}{N \cdot \Delta t} \quad (6.13)$$

La amplitud ( $A$ ) y la componente de fase ( $\phi$ ) de la transformada compleja pueden ser calcularse como se indica a continuación:

$$A_n = \sqrt{Re_n^2 + Im_n^2}; \phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{Im_n}{Re_n}\right) \quad (6.14)$$

### 6.3.4 MATERIALES Y PROBETAS

Se creó una muestra en forma de probeta utilizando una placa de aluminio de aleación 6161-T6 con una muesca en forma de "V". La placa tenía dimensiones de 370 mm x 280 mm x 2 mm, y la muesca tenía una profundidad de 20 mm y una anchura de 5 mm (Figura 6.3.2). Con el fin de crear una concentración de tensiones que indujera fatiga, se prefabricó una pequeña hendidura en la punta de la muesca con una longitud de 10 mm y una anchura de 200  $\mu$ m. La probeta se sometió a una carga cíclica de tracción sinusoidal a una frecuencia de 10 Hz utilizando una máquina de ensayos (SANS 5205). El proceso de carga cíclica se detuvo una vez que se inició la formación de una grieta. Posteriormente, se retiró la probeta de la máquina de ensayo y se midió la anchura de la grieta a una altura de 10 mm desde su inicio.

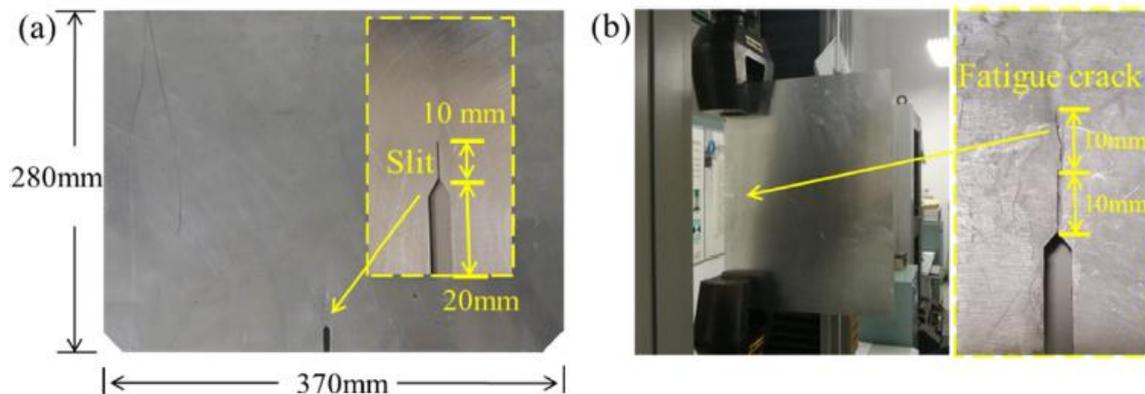


Figura 6.3.2: (a) Probeta de aluminio y (b) grieta después del ciclo de carga. [29]

La Figura 6.3.3 muestra la morfología de la punta de la grieta, que fue observada utilizando un microscopio (KEYENCE VHX-2000). Se pudo observar una deformación plástica evidente en la zona cercana a la grieta, así como la formación de pliegues.

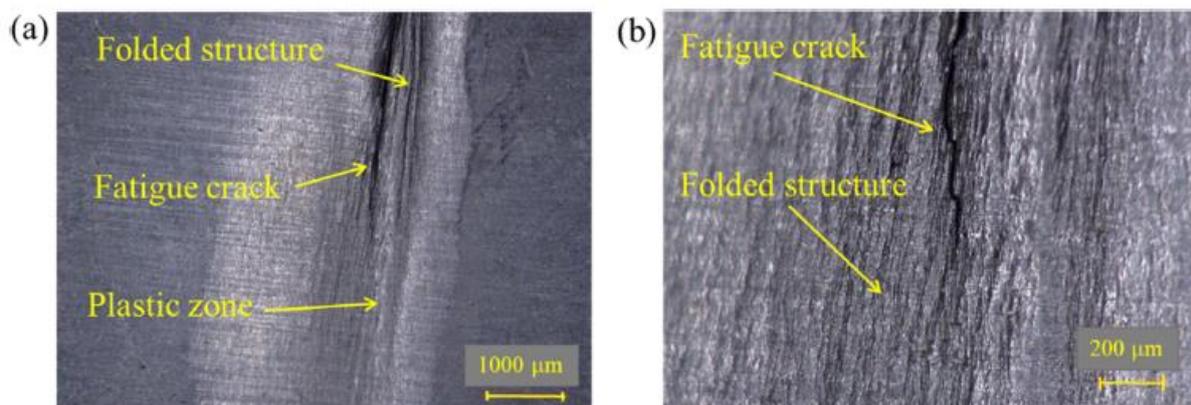


Figura 6.3.3: (a) Imagen metalográfica con aumento x20 y (b) imagen metalográfica con aumento x100. [29]

### 6.3.5 EXPERIMENTO DE INSPECCIÓN VIBROTÉRMICA

En la Figura 6.3.4 se muestra el montaje experimental utilizado, el cual incluye un generador de señales, un amplificador de tensión, una cámara infrarroja, un transductor PZT y un ordenador que controla la cámara.

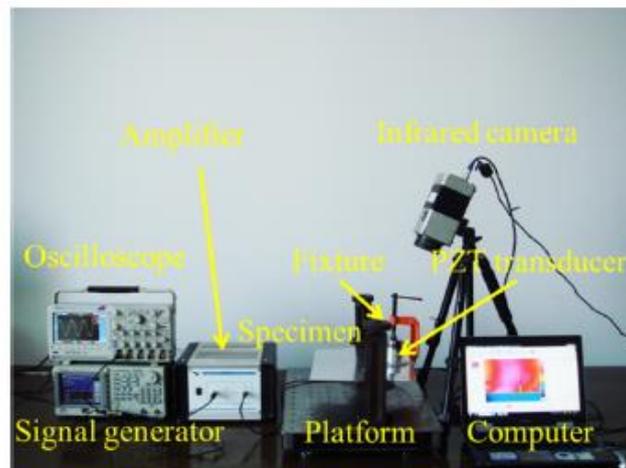


Figura 6.3.4: Disposición experimental. [29]

Se generó una señal sinusoidal utilizando el generador de señales (Tek AFG3101) y se amplificó con un amplificador de tensión (Falco System WMA-300). La señal de excitación, con una tensión de  $150 V_{pp}$ , se aplicó al transductor PZT, el cual funcionó a una frecuencia de 37.7 kHz para obtener la máxima potencia. La probeta se sujetó en ambos extremos con abrazaderas, y el transductor PZT se montó en la parte superior de la placa. Se utilizó una cámara infrarroja altamente sensible (InfraTec VarioCAM HD) para grabar imágenes térmicas con una resolución de  $1024 \times 768$  píxeles, una frecuencia de imagen de 30 Hz y una sensibilidad térmica de 30 mK. El ordenador se utilizó para adquirir y procesar los datos de las imágenes.

Los experimentos de vibrotermografía se llevaron a cabo en el siguiente orden:

- i. Antes de la excitación ultrasónica, se registró secuencialmente el campo de temperatura en la superficie de la probeta durante 5 segundos.
- ii. Luego, se procedió a la excitación del transductor PZT para estimular la probeta, y se registró continuamente el campo de temperatura utilizando una cámara infrarroja.
- iii. Después de la excitación, se continuó registrando el campo de temperatura durante 5 segundos durante el enfriamiento.
- iv. Para eliminar el ruido de fondo, todas las imágenes térmicas se restaron del fondo, el cual se obtuvo promediando la secuencia térmica antes de la excitación.
- v. La secuencia de imágenes resultante se procesó utilizando una transformada rápida de Fourier.

vi. A partir de las imágenes de amplitud y fase obtenidas, se estimó la longitud de la grieta.

Este procedimiento permitió obtener datos precisos sobre la temperatura en la superficie de la probeta y realizar un análisis cuantitativo de la grieta mediante el procesamiento de las secuencias térmicas.

### 6.3.6 SIMULACIÓN NUMÉRICA

Para seguir investigando el mecanismo de generación de calor en la superficie de la grieta de la placa de aluminio, se realizó un análisis de elementos finitos vibrotermográfico utilizando el software comercial Abaqus.

Se creó un modelo tridimensional, como se muestra en la [Figura 6.3.5](#), con dimensiones similares a las del experimento anterior. En el extremo de la muesca, se generó una grieta en forma de "V" con una longitud de 20 mm y una anchura de 20 μm para simular una grieta por fatiga. En la [Tabla 6.3.1](#) se proporcionan las propiedades mecánicas y térmicas de la aleación de aluminio utilizada en el modelo.

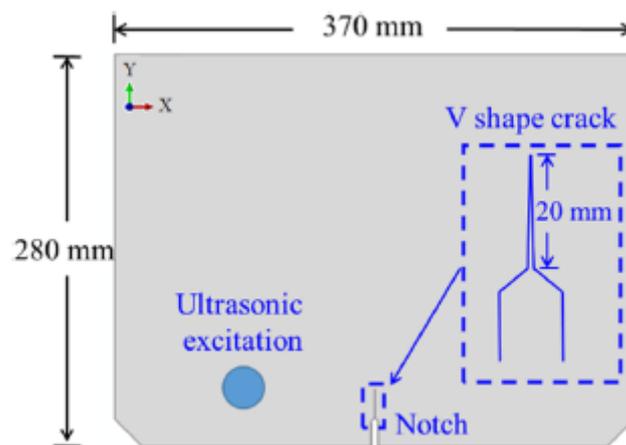


Figura 6.3.5: Modelo esquemático tridimensional de la simulación. [29]

Tabla 6.3.1: Propiedades de la aleación de aluminio modelada. [29]

Properties	Value	Properties	Value
Young's modulus $E$ (GPa)	70	Thermal conductivity $\lambda$ (W/m <sup>2</sup> °C)	121
Poisson ratio $\nu$	0.33	Specific heat capacity $c_p$ (J/kg° C)	875
Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2780	Thermal expansion coefficient (K <sup>-1</sup> )	22
Static friction coefficient	1	Dynamic friction coefficient	0.3

Al igual que en el experimento, la probeta se fijó en ambos extremos y se dejó sin restricciones la superficie de la grieta. En la simulación, tanto la temperatura inicial de la placa como la temperatura ambiente se establecieron en 20 °C. Se fijó un coeficiente de transferencia de calor por convección hacia el entorno de 10 W/(m<sup>2</sup>K) para todas las caras de la probeta. Se impuso un desplazamiento periódico fuera del plano en los nodos correspondientes a la ubicación del transductor PZT, que simulaba la excitación ultrasónica. La condición de contorno para el desplazamiento se expresó de la siguiente manera:

$$y = A \sin(2\pi ft) \quad (6.15)$$

La amplitud A se determinó mediante el coeficiente de deformación piezoeléctrica de la oblea y el potencial aplicado entre los electrodos.

Para mejorar la eficiencia computacional, se asignaron elementos tetraédricos con 10 nodos y acoplamiento térmico de segundo orden modificado (C3D10MT) en la zona adyacente a la muesca y a la grieta. En la otra región de la placa se utilizaron elementos de tipo ladrillo con 8 nodos y acoplamiento térmico (C3D8RT). Se realizó un análisis de sensibilidad del tamaño de la malla para verificar la convergencia numérica, y se estableció un tamaño de malla de 1 mm para el C3D10MT.

- **Calentamiento de las superficies de las grietas por fricción inducida con ultrasonidos:** El tiempo de excitación ultrasónica se estableció en 10 ms, y se definió una función de fricción en las propiedades de contacto.
- **Conducción térmica en la placa de aluminio tras su excitación:** El tiempo de conducción de calor se fijó en 100 ms. Se extrajeron los resultados numéricos de la distribución de temperatura, desplazamiento y tensión normal en la superficie de la grieta para estudiar el mecanismo de transferencia de calor.

### 6.3.7 RESULTADOS EXPERIMENTALES

La [Figura 6.3.6 \(a\)](#) muestra la imagen térmica de la probeta capturada mediante una cámara termográfica después de la excitación ultrasónica. En la región A, se encuentra la muesca en forma de "V" y la grieta, las cuales son áreas de interés debido a la concentración de tensiones y los esfuerzos cíclicos a los que están sometidas. Se puede observar que la temperatura en la zona de la grieta en la región A es ligeramente mayor que en las áreas circundantes. Esto se debe principalmente al calor

generado por la fricción en la superficie de la grieta. En la región B, que se encuentra en el borde derecho de la probeta, también se observa una pequeña zona con temperatura más alta, probablemente causada por la reflexión de la luz ambiental en la superficie de la placa.

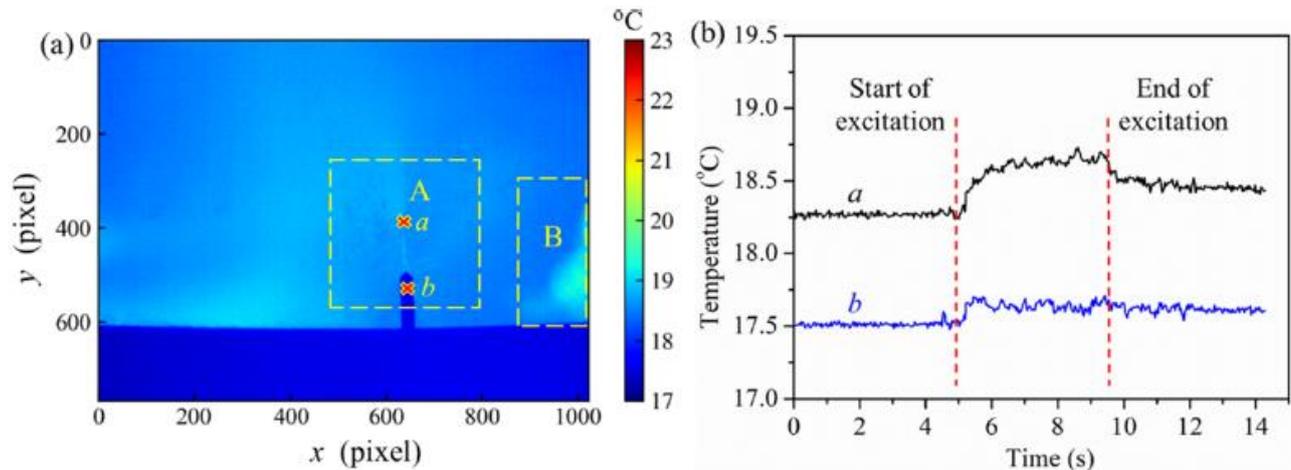


Figura 6.3.6: (a) Imagen térmica de la probeta tras la estimulación ultrasónica y (b) gráfica de la variación de la temperatura en función del tiempo de los puntos a y b. [29]

Para analizar la variación de temperatura durante la excitación ultrasónica, se registraron los historiales de temperatura de dos puntos en la región A. El punto a se encontraba en la superficie de la grieta, mientras que el “punto b” estaba en la muesca. La Figura 6.3.6 (b) muestra que la temperatura del “punto a” antes de la excitación ultrasónica era de aproximadamente 18,2 °C, lo cual es 0,7 °C más alta que la temperatura ambiente indicada por el punto b. Durante la excitación ultrasónica, la temperatura del punto a aumentó gradualmente en 0,4 °C y se mantuvo constante hasta que cesó la excitación. El ligero aumento de temperatura en el punto b después de la estimulación ultrasónica puede deberse a interferencias electromagnéticas del equipo o a la influencia de la temperatura ambiente.

Con el fin de obtener un buen contraste y realizar un análisis cuantitativo de la grieta por fatiga, se restó el fondo de la secuencia de imágenes. La Figura 6.3.7 (a) muestra la imagen resultante para la región A (258x232 píxeles). Es evidente que el contraste de la grieta en la imagen mejoró significativamente, permitiendo distinguir claramente la grieta. Esto demuestra que el aumento de temperatura en la superficie de la grieta bajo la excitación ultrasónica es mayor que en la región no dañada.

Para caracterizar la generación de calor, se seleccionó la temperatura máxima de la superficie de la grieta como indicador. La temperatura máxima en la superficie de la grieta se extrajo de las imágenes,

cambiando el tiempo de excitación de 5 a 50 s. La Figura 6.3.7 (b) muestra la relación entre la temperatura máxima y el tiempo de excitación ultrasónica. Se puede observar que cuando el tiempo de excitación ultrasónica es inferior a 10 s, el pico temperatura máxima aumenta rápidamente con el tiempo de excitación, lo cual se debe a la generación de calor por fricción bajo la excitación ultrasónica. Con el aumento de la temperatura de la superficie de la grieta también aumenta el intercambio de calor entre la grieta y el entorno circundante, lo que conduce a una disminución de la eficacia del calentamiento de la superficie de la grieta. Cuando el tiempo de excitación ultrasónica supera los 10 segundos, una cantidad significativa de calor generada por el transductor es absorbida por la grieta, lo que resulta en un aumento de la diferencia de temperatura en comparación con el fondo. Es importante destacar que la temperatura máxima se obtuvo de las imágenes sustraídas del fondo, y los valores para diferentes tiempos de excitación no corresponden a variaciones de temperatura en posiciones fijas. Dado el efecto de la generación de calor del transductor PZT, se recomienda que el tiempo de excitación ultrasónica no supere los 10 segundos.

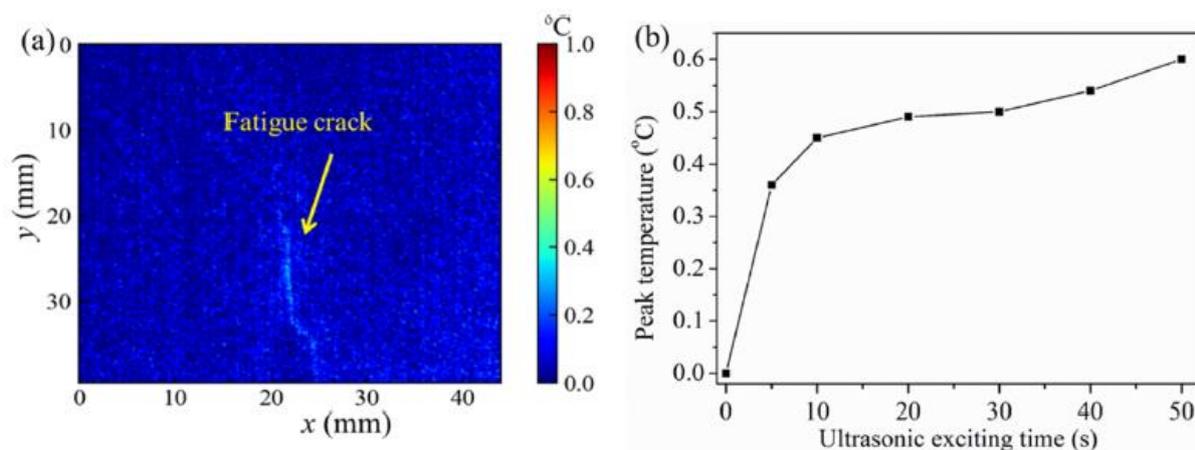


Figura 6.3.7: (a) Imagen térmica con sustracción de fondo de la grieta y (b) relación entre la temperatura máxima y el tiempo de excitación. [29]

La longitud de la grieta es un parámetro crucial en la mecánica de la fractura. Para mejorar la precisión de la medición de la longitud de la grieta, se procesó la secuencia de imágenes térmicas obtenidas. La longitud de la grieta resultó ser de aproximadamente 13 mm, incluyendo la longitud de la hendidura. Con base en los resultados experimentales del tiempo de excitación, el transductor PZT fue estimulado durante 10 segundos, y se capturó la distribución de temperatura en la superficie de la muestra mediante una cámara de infrarrojos. Las imágenes térmicas secuenciales desde el inicio hasta el final

de la excitación se restaron del fondo y se procesaron utilizando el método de la transformada rápida de Fourier (FFT).

La Figura 6.3.8 muestra las imágenes de amplitud y fase a frecuencias de 0,1; 0,2 y 0,5 Hz. Con el aumento de la frecuencia, la detectabilidad de los defectos disminuye. Cuando la frecuencia es de 0,1 Hz, tanto la imagen de amplitud como la de fase muestran el mayor contraste en comparación a las imágenes correspondientes a las otras dos frecuencias. La longitud de la grieta (incluida la longitud de la hendidura) puede medirse como 16,1 y 19,2 mm a partir de las imágenes de amplitud y de fase, respectivamente. En comparación con la longitud real de la grieta, el error de la imagen de amplitud es del 19,7%, y el de la imagen de fase es del 4,3%.

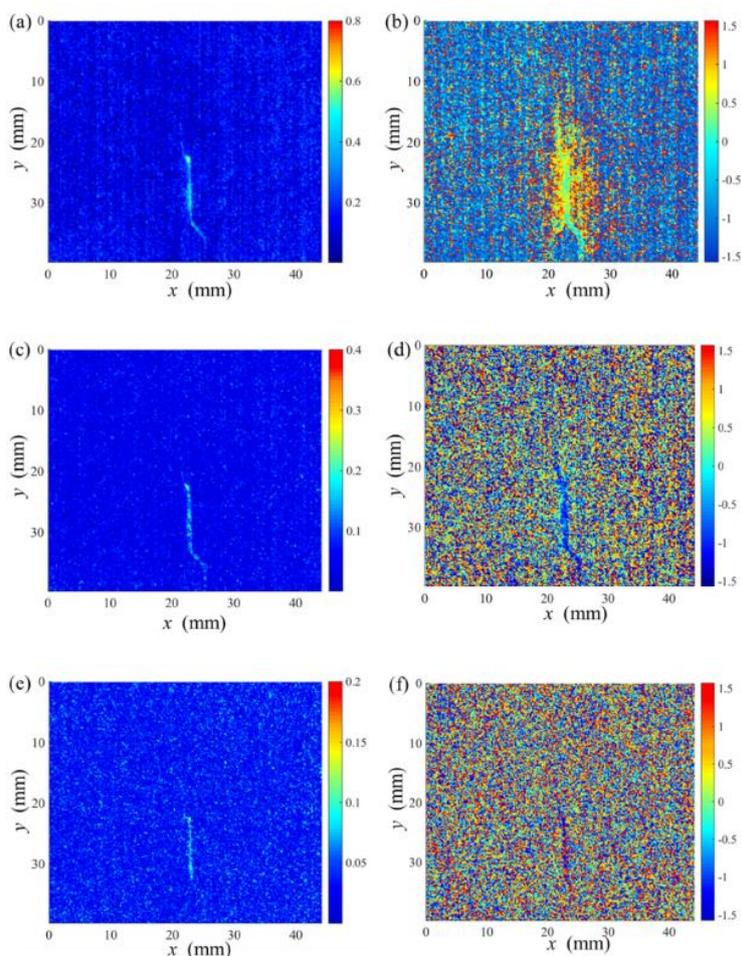


Figura 6.3.8: Amplitud y fase de las imágenes FFT: (a) Imagen de amplitud y (b) de fase a una frecuencia de 0,1 Hz; (c) Imagen de amplitud y (d) de fase a una 0,2 Hz; (e) Imagen de amplitud y (f) de fase a una 0,5 Hz. [29]

### 6.3.8 RESULTADOS NUMÉRICOS

Se realizaron simulaciones de elementos finitos para estudiar la generación de calor en la grieta bajo excitación ultrasónica. En esta sección, se analiza el mecanismo de generación de calor en la superficie de la grieta y los factores que influyen en él.

La Figura 6.3.9 (a) muestra la distribución de temperatura en la superficie de la grieta a un tiempo "t" de 10 ms. Se observa que el calor se genera cerca de la punta de la grieta (punto f), lo que provoca un aumento de la temperatura. La temperatura máxima en el punto f supera los 30°C. Sin embargo, la velocidad máxima de vibración y la temperatura máxima no se localizan en el punto f, ya que la vibración de la partícula en ese punto está limitada por el medio circundante. La Figura 6.3.9 (b) muestra la velocidad de vibración tangencial a lo largo del eje z en los puntos e, f y g. Aunque el punto g se encuentra en la superficie de la grieta, no se observa un aumento significativo de la temperatura. Se puede observar que la velocidad de vibración de las partículas aumenta a medida que se alejan del punto hacia la punta de la grieta.

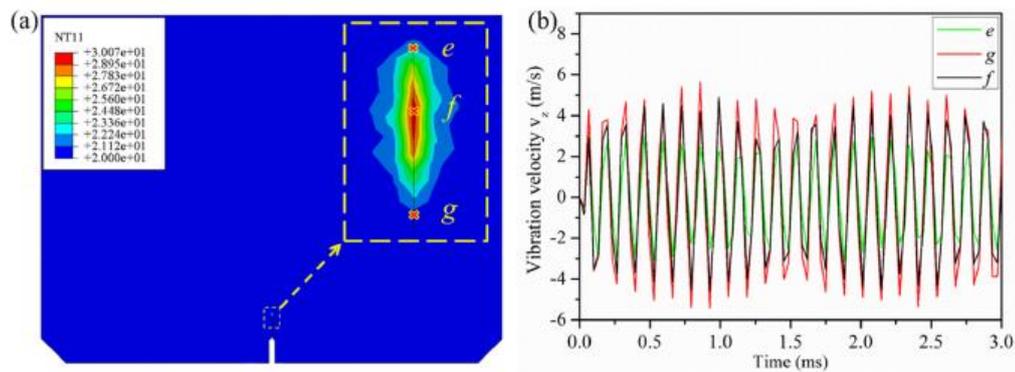


Figura 6.3.9: (a) Distribución de la temperatura en la superficie de la grieta para  $t = 10 \text{ ms}$  y (b) velocidad de vibración tangencial en lo puntos e, f y g. [29]

La Figura 6.3.10 muestra el desplazamiento relativo ( $u_1 - u_2 - d$ ) del par de contacto en el punto f a lo largo del eje x. Cuando el desplazamiento relativo  $u_1 - u_2$  es menor que  $2 \mu\text{m}$  (anchura de la grieta en el punto f), la superficie de la grieta está abierta. Debido a las propiedades de contacto definidas, cuando la superficie de la grieta entra en contacto, el desplazamiento relativo  $u_1 - u_2$  menos la anchura de la superficie de la grieta debe ser igual a 0.

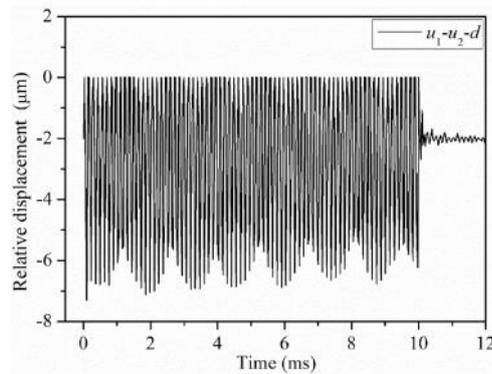


Figura 6.3.10: Desplazamiento relativo  $u_1 - u_2 - d$  del par de contacto en el punto f. [29]

La Figura 6.3.11 muestra la tensión normal en los puntos e, f y g bajo excitación ultrasónica. Cuando una onda ultrasónica se propaga a través de la punta de la grieta, la partícula en el punto e vibra periódicamente. Como el punto g está en estado libre y no hay interacción de contacto, la tensión normal fluctúa entorno a valores cercanos a cero. En cambio, la tensión normal en el punto f es negativa, lo que indica que está en estado de compresión y hay contacto y fricción en ese punto.

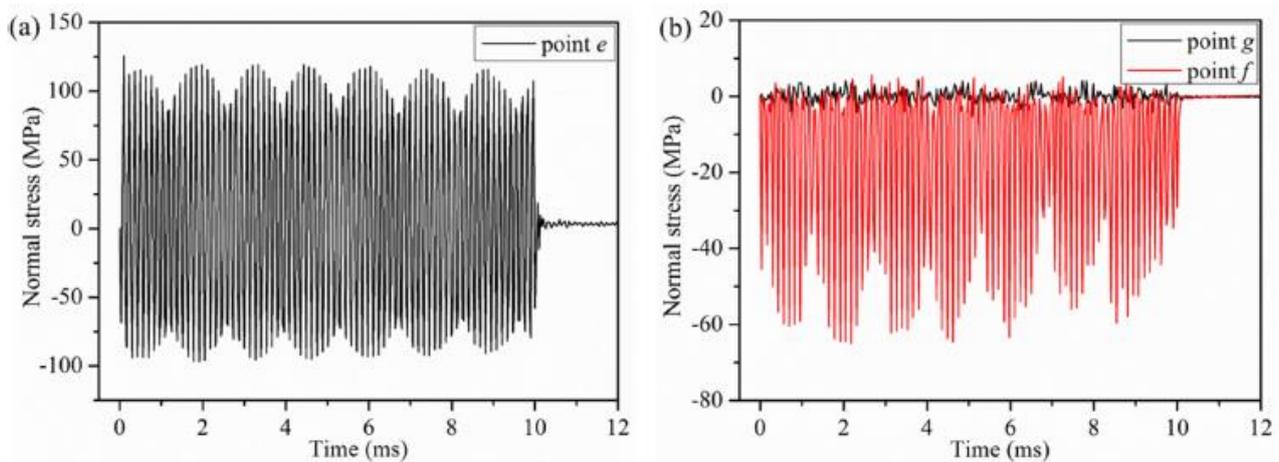


Fig. 11. Normal stresses (a) at point e and (b) at points f and g.

Figura 6.3.11: Esfuerzos normales (a) en el punto e y (b) en los puntos f y g. [29]

En cuanto a los factores que influyen en la generación de calor, durante la investigación ultrasónica se examinaron el tiempo de excitación, la anchura de la grieta y el coeficiente de fricción. Estos factores juegan un papel importante en la generación de calor durante la excitación ultrasónica.

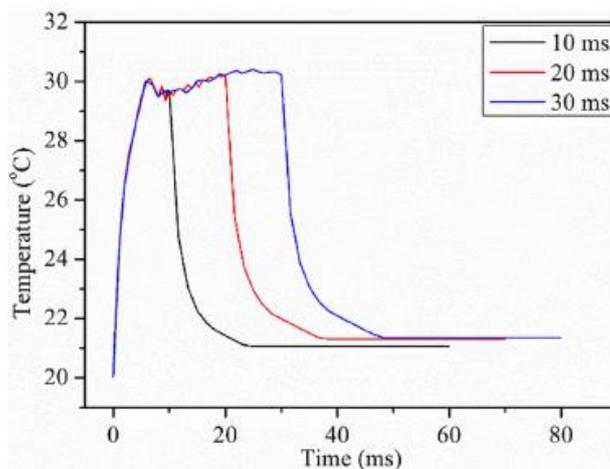


Figura 6.3.12: Variación de la temperatura en función del tiempo de excitación en el punto de máxima temperatura. [29]

La Figura 6.3.12 muestra la variación de la temperatura máxima en la superficie de la grieta para una excitación ultrasónica de 10, 20 y 30 ms. Se observa que la temperatura máxima aumenta rápidamente hasta alcanzar su valor máximo con aproximadamente 10 ms de excitación ultrasónica. Luego, la temperatura gradualmente alcanza un estado de equilibrio hasta que se detiene la excitación. Estos resultados de simulación son similares a los obtenidos en el experimento, aunque cabe mencionar que la simulación se realizó en un estado adiabático, mientras que en el experimento la temperatura de la superficie de la grieta se ve influenciada por la conducción de calor del entorno y la excitación del transductor. Por lo tanto, los valores de la temperatura máxima y su tiempo correspondiente de excitación son diferentes entre la simulación y el experimento.

El coeficiente de fricción está estrechamente relacionado con las características de las superficies de contacto, como la rugosidad, la temperatura, la fuerza normal y la velocidad tangencial relativa. La fricción entre las superficies de contacto determina la cantidad de calor generado por la fricción.

En la Figura 6.3.13 (a) se muestra la relación entre la temperatura máxima y el coeficiente de fricción dinámico para una excitación ultrasónica de 10 ms. Se observa que a medida que aumenta el coeficiente de fricción dinámico, la temperatura máxima en la superficie de la grieta aumenta de 26,8 a 32,6 °C.

Además, se realizaron simulaciones variando la anchura de la grieta en el rango de 5 a 30  $\mu\text{m}$ , manteniendo constantes los demás parámetros. La Figura 6.1.13 (b) muestra la relación entre la temperatura máxima y la anchura de la grieta.

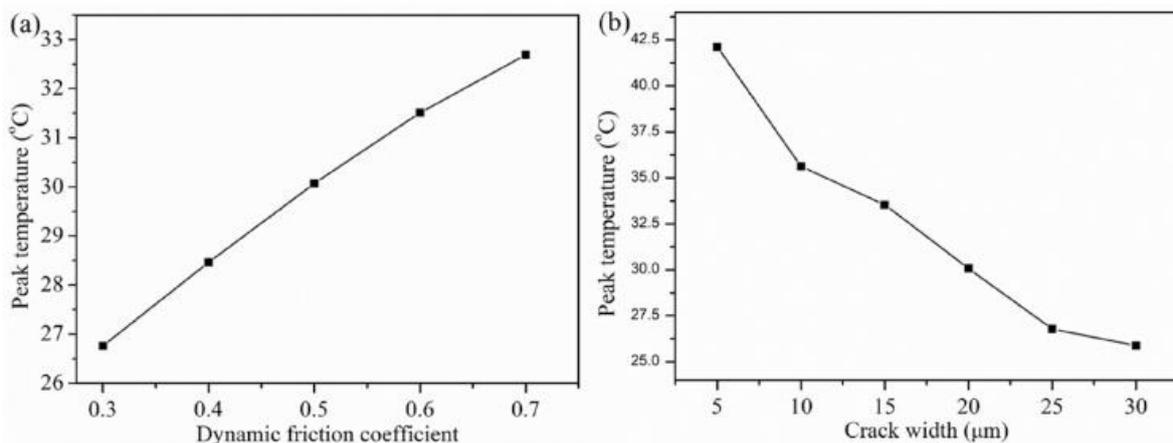


Figura 6.3.13: Efectos del (a) coeficiente de fricción dinámica y (b) anchura de la grieta a temperatura máxima. [29]

Se observa que a medida que la anchura de la grieta aumenta, la temperatura máxima disminuye gradualmente de 42.1 a 25.9 °C. Esto se debe a que, con un aumento en la anchura de la grieta, la tensión normal causada por el contacto disminuye y la duración de la fricción de contacto en la superficie de la grieta se reduce durante un ciclo de excitación ultrasónica. Estos factores reducen la generación de calor en la superficie de la grieta, lo que indica que la anchura de la grieta también afecta la intensidad del contacto entre las superficies de la grieta.

---

# 7 Conclusiones

---

## 7.1.1 APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA

La termografía infrarroja ha demostrado ser una herramienta invaluable en una amplia variedad de campos y aplicaciones. A lo largo de este estudio, hemos explorado los fundamentos de la termografía, desde la radiación electromagnética y la transmisión de calor por radiación hasta la teoría y el funcionamiento de las cámaras termográficas. También hemos discutido las buenas prácticas y la guía para llevar a cabo inspecciones precisas y fiables. Ahora, en esta conclusión, resumiremos las principales aplicaciones de la termografía infrarroja y su potencial para el futuro.

En el campo de la edificación, la termografía ha demostrado ser esencial para inspecciones cualitativas y cuantitativas de edificios. Se ha utilizado para detectar defectos en el aislamiento, fugas de aire, humedad y puentes térmicos. También ha sido útil en la inspección de sistemas de calefacción y climatización, así como en la evaluación de la estanqueidad de los edificios. Con la técnica de "blower door", la termografía ha mejorado la eficiencia energética y ha proporcionado recomendaciones para la rehabilitación de edificios.

En el ámbito del mantenimiento predictivo, la termografía ha sido una herramienta valiosa en la inspección de sistemas eléctricos, mecánicos y térmicos, incluyendo instalaciones de conductos, tuberías y válvulas, así como sistemas refractarios y petroquímicos. Además, en la industria de las energías renovables, como turbinas eólicas y paneles solares, la termografía ha contribuido a mejorar la eficiencia y el rendimiento de estos sistemas.

En la industria automovilística y láser, la termografía ha demostrado su utilidad en el control de procesos, como la sinterización, el corte y la soldadura por láser. También se ha utilizado para la detección de infiltraciones de agua en estructuras aeronáuticas y en la seguridad nacional para la detección de movimientos en sistemas de defensa.

La termografía aérea ha desempeñado un papel importante en la extinción de incendios desde el aire, en la investigación agrícola y agricultura de precisión, así como en el mapeo de incendios y geográfico. También ha sido utilizada en la inspección aérea y el mantenimiento de líneas eléctricas.

En otros campos, como la industria química, del vidrio, metalúrgica, de los plásticos, médica, geología, ganadería, agricultura, vida silvestre y análisis de tensión y fatiga, la termografía ha proporcionado información valiosa para la detección de problemas, el control de calidad y la investigación.

Además, la termografía infrarroja ha evolucionado hacia aplicaciones más especializadas, como la termografía espectral de alta velocidad, ensayos no destructivos, análisis de tensión y fatiga, y el estudio de sistemas electrónicos.

Si bien la termografía infrarroja ha demostrado ser una herramienta poderosa y versátil, también es importante reconocer las limitaciones y desafíos asociados con su uso. La precisión y la confiabilidad de las mediciones pueden verse afectadas por factores como la emisividad, la reflexión y la transmisión de los materiales, así como las condiciones ambientales y la calibración adecuada de las cámaras.

En conclusión, la termografía infrarroja ha revolucionado la forma en que visualizamos y evaluamos una amplia variedad de sistemas y procesos. Su capacidad para proporcionar información no invasiva y en tiempo real la convierte en una herramienta esencial en diversas industrias y campos de aplicación. A medida que la tecnología continúa avanzando, podemos esperar que la termografía infrarroja siga desempeñando un papel crucial en el diagnóstico, el mantenimiento predictivo y la mejora de la eficiencia en una amplia variedad de aplicaciones industriales y científicas.

### **7.1.2 INSPECCIÓN DEL ALTERNADOR**

Es aconsejable realizar un análisis más detallado y una inspección física para identificar posibles problemas en los componentes eléctricos y el sistema de enfriamiento. Se considera fundamental que cualquier hallazgo de temperaturas anormales se aborde adecuadamente y se tomen las medidas correctivas necesarias para garantizar el funcionamiento seguro y eficiente del alternador en el patrullero. Se recomienda realizar una evaluación más exhaustiva y realizar pruebas adicionales para determinar con precisión las causas de las temperaturas elevadas en las zonas "A" y "EI". En caso de identificar temperaturas fuera de los límites aceptables o anomalías preocupantes, se deben tomar medidas correctivas, como realizar reparaciones o ajustes en el sistema de enfriamiento, mejorar las conexiones eléctricas o revisar las cargas eléctricas del alternador.

Tabla 6.3.1: Posibles causas de un malfuncionamiento de un alternador y medidas correctoras. [30]

Problema	Descripción	Medidas correctoras
<b>Sobrecarga</b>	Si el alternador está operando por encima de su capacidad nominal o si se están demandando cargas eléctricas excesivas, esto podría generar un aumento en la temperatura del estator debido al estrés adicional en los componentes.	<p>Verificar la capacidad nominal del alternador y si las cargas eléctricas no superan este límite.</p> <p>Considerar la posibilidad de instalar un segundo alternador si la carga eléctrica sigue superando la capacidad nominal del equipo.</p>
<b>Resistencia eléctrica elevada</b>	La presencia de conexiones eléctricas defectuosas, cables dañados o terminales flojos puede generar resistencia adicional y, por lo tanto, aumentar la temperatura en las zonas correspondientes.	<p>Realizar una inspección visual y física de las conexiones eléctricas, y reemplazarlas si se encuentran defectuosas o dañadas.</p> <p>Verificar que los cables estén en buen estado y que las terminales estén ajustadas correctamente.</p>
<b>Flujo de aire insuficiente</b>	Un flujo de aire inadecuado alrededor del alternador puede dificultar la disipación del calor, lo que puede resultar en temperaturas más altas en áreas específicas	<p>Verificar la disposición del generador y asegurarse de que haya espacio suficiente alrededor del equipo para permitir un flujo de aire adecuado.</p> <p>Instalar ventiladores o dispositivos de enfriamiento adicionales si es necesario para asegurar un flujo de aire suficiente.</p>
<b>Refrigeración insuficiente</b>	Si el sistema de refrigeración del alternador presenta fallas, como un mal funcionamiento del ventilador o un mal flujo de refrigerante, esto puede contribuir al aumento de temperatura en las zonas identificadas.	<p>Verificar el sistema de refrigeración del alternador y solucionar cualquier problema con el ventilador o flujo de refrigerante.</p> <p>Considerar la posibilidad de instalar un sistema de refrigeración adicional si se necesita más capacidad de enfriamiento.</p>

### 7.1.3 INSPECCIÓN DE INSTALACIONES DE DE BAJA TENSIÓN

En conclusión, la inspección termográfica llevada a cabo en las instalaciones de LATEM Aluminium, en colaboración con RENOVETEC, ha resultado ser una herramienta altamente efectiva para identificar posibles puntos calientes y malfuncionamientos en los cuadros eléctricos de la empresa. Los cuadros eléctricos desempeñan un papel fundamental en la distribución de energía y el control de los equipos utilizados en los procesos de fabricación y producción de aluminio. Un malfuncionamiento en estos equipos podría dar lugar a interrupciones en el suministro eléctrico, retrasos en la producción y pérdida de clientes, así como comprometer la calidad del producto final.

La inspección termográfica ha permitido detectar de manera precisa y detallada posibles anomalías, clasificándolas en cuatro niveles de gravedad para evaluar la magnitud de los defectos encontrados. Estos niveles de clasificación brindan una guía clara para tomar acciones preventivas y correctivas, priorizando aquellos problemas que representan un mayor riesgo para la seguridad y el rendimiento del sistema eléctrico.

El alcance de la inspección termográfica fue exhaustivo, abarcando la revisión de todos los cuadros eléctricos presentes en la planta. Se utilizó una cámara termográfica de alta resolución y sensibilidad, lo que permitió capturar imágenes claras y detalladas de los cuadros eléctricos inspeccionados, incluso en condiciones de funcionamiento normal.

Los resultados obtenidos en la inspección se presentaron de manera estructurada, incluyendo información general, medidas tomadas, análisis de datos, termograma y fotografía ordinaria. Además, se aplicó un criterio de clasificación de averías basado en estándares reconocidos para una evaluación más detallada y precisa de la gravedad de los defectos.

En resumen, la inspección termográfica realizada ha proporcionado a LATEM Aluminium información valiosa para prevenir futuras fallas, garantizar un suministro eléctrico estable, mantener la calidad de la producción y preservar la seguridad de sus empleados y sus instalaciones. La implementación de las recomendaciones brindadas por el equipo de RENOVETEC permitirá mantener la integridad del sistema eléctrico y contribuirá a la eficiencia y competitividad de la empresa en su industria.

## 7.1.4 INSPECCIÓN DE INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

La inspección termográfica de sistemas fotovoltaicos es una herramienta eficaz para localizar rápidamente defectos potenciales en las celdas y placas solares, así como detectar posibles problemas de conexión eléctrica. Estas inspecciones se realizan mientras el sistema está en funcionamiento normal, sin necesidad de apagarlo.

Las inspecciones regulares con cámaras termográficas, desde la fase de instalación hasta las revisiones periódicas, permiten una supervisión integral y sencilla del sistema. Esto contribuye a mantener la funcionalidad de los paneles solares y a prolongar su vida útil. La utilización de cámaras termográficas para la inspección de paneles solares mejora significativamente la rentabilidad de la inversión en energía solar.

### 7.1.4.1 PROCEDIMIENTOS Y CONDICIONES DE MEDICIÓN

Para obtener termografías precisas y relevantes, es importante seguir ciertos procedimientos y condiciones de medición. A continuación, se detallan las principales recomendaciones:

- Utilizar una cámara termográfica adecuada con los accesorios necesarios: La elección de una cámara termográfica de calidad es crucial para obtener imágenes claras y detalladas. Se deben seleccionar modelos que ofrezcan una resolución adecuada y sensibilidad térmica para capturar con precisión las diferencias de temperatura en los paneles solares.
- Asegurarse de tener una irradiancia solar suficiente: La irradiancia solar es un factor determinante para el éxito de la inspección termográfica. Se recomienda realizar las mediciones cuando la irradiancia solar sea de al menos  $500 \text{ W/m}^2$ , aunque preferiblemente debe ser más alta para obtener mejores resultados.
- Mantener un ángulo de visión seguro: Durante la inspección, es esencial mantener un ángulo de visión seguro, que normalmente se encuentra entre  $5^\circ$  y  $60^\circ$ . Esto garantiza que las mediciones se realicen desde una posición adecuada para obtener imágenes precisas y evitar errores en la interpretación de los resultados.
- Evitar el ensombrecimiento y las reflexiones: Es fundamental evitar cualquier fuente de ensombrecimiento o reflexión que pueda interferir en las mediciones termográficas. Se debe

asegurar que no haya sombras de objetos cercanos o reflexiones de superficies que puedan alterar la temperatura de los paneles solares y generar resultados inexactos.

#### 7.1.4.2 SUGERENCIAS PARA EL MANTENIMIENTO Y MEJORA DEL RENDIMIENTO DE LOS PANELES

Con el fin de garantizar un óptimo rendimiento y prolongar la vida útil de los paneles solares, es fundamental implementar un programa de mantenimiento preventivo. A continuación, se presentan algunas sugerencias clave para mantener y mejorar el rendimiento de los paneles solares en el parque solar:

- 1. Inspecciones regulares:** Se recomienda realizar inspecciones periódicas de los paneles solares, al menos una vez al año, para identificar posibles problemas antes de que se conviertan en fallas importantes. Estas inspecciones deben llevarse a cabo utilizando cámaras termográficas y otros dispositivos de medición para detectar puntos calientes, conexiones defectuosas u otros problemas.
- 2. Limpieza y mantenimiento:** La acumulación de suciedad, polvo y escombros en la superficie de los paneles solares puede reducir su eficiencia y afectar la cantidad de energía generada. Se sugiere llevar a cabo limpiezas periódicas de los paneles solares para garantizar que la luz solar se absorba de manera óptima y se convierta en energía eléctrica de manera eficiente.
- 3. Revisión de conexiones:** Es importante realizar una revisión completa de todas las conexiones eléctricas en el parque solar para identificar y corregir conexiones sueltas o corroídas. Un flujo de corriente adecuado es crucial para mantener un rendimiento óptimo y evitar pérdidas de energía.
- 4. Optimización de la orientación y ángulo de inclinación:** Considerar la optimización de la orientación y el ángulo de inclinación de los paneles solares puede aumentar significativamente la cantidad de energía generada. Realizar un análisis de la posición solar y ajustar los paneles en consecuencia mejorará el rendimiento general del sistema.
- 5. Monitoreo y análisis de datos:** Implementar un sistema de monitoreo continuo para recopilar datos sobre el rendimiento de los paneles solares es una herramienta invaluable para identificar cualquier cambio o problema en el sistema. El análisis de datos permitirá detectar

tendencias y patrones, lo que ayudará a tomar decisiones informadas para el mantenimiento y mejora del rendimiento.

- 6. Capacitación del personal:** Asegurar que el personal encargado del mantenimiento de los paneles solares esté debidamente capacitado y familiarizado con las técnicas de inspección y mantenimiento es esencial para garantizar la eficiencia y seguridad en las operaciones. Capacitar al personal en el uso de cámaras termográficas y otros equipos de medición permitirá una inspección adecuada y precisa.
- 7. Registro y seguimiento de las acciones tomadas:** Mantener un registro detallado de las inspecciones realizadas, los problemas identificados y las acciones tomadas para abordarlos permitirá un seguimiento adecuado del estado y la eficiencia del sistema en el tiempo. Esto ayudará a evaluar la efectividad de las estrategias de mantenimiento y realizar ajustes si es necesario.
- 8. Colaboración con expertos:** Contar con la asesoría y colaboración de expertos en energía solar y mantenimiento preventivo puede ser beneficioso para mejorar la eficiencia y rendimiento del parque solar. Estos profesionales pueden brindar conocimientos especializados y mejores prácticas para optimizar el funcionamiento del sistema.

Al implementar estas sugerencias en el programa de mantenimiento del parque solar, se asegurará un funcionamiento eficiente y confiable de los paneles solares, lo que contribuirá significativamente a la generación de energía sostenible y al uso de fuentes renovables. El mantenimiento preventivo y la mejora continua del rendimiento son fundamentales para maximizar el potencial del parque solar y garantizar un impacto positivo en la sostenibilidad y el medio ambiente.

### **7.1.5 APLICACIONES DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA PARA EL ESTUDIO DE FLUIDOS**

- Los recuentos de fotones de las mediciones pueden correlacionarse con la intensidad de la radiación utilizando una calibración de cuerpo negro.
- Las principales ventajas que ofrece esta técnica en comparación con otras técnicas no intrusivas son:

- Se pueden obtener mediciones tanto cuantitativas como cualitativas que pueden realizarse fácilmente y en entornos en los que otras técnicas pueden no sean prácticas o viables.
- A fin de proporcionar información física sobre las características del flujo, la termografía infrarroja puede aplicarse en una amplia gama de escalas de longitud y valores escalares.
- Los recientes avances en las imágenes hiperspectrales (espectrómetros de Fourier) permiten realizar mediciones espaciales de  $I_\lambda$  y a mayor velocidad, mejorando significativamente la utilidad de la termografía infrarroja.
- El uso de la termografía infrarroja para caracterizar el flujo dentro o desde los dispositivos reales puede proporcionar resultados muy buenos cuando se combina con el láser o la obtención de imágenes en otras longitudes de onda dado que permiten determinar la distribución de las diferentes especies gaseosas.
- Algunas de las desventajas de la termografía infrarroja que pueden dificultar la caracterización de la física asociada a los flujos son:
  - Las mediciones requieren línea de visión directa.
  - Los valores escalares se determinan indirectamente, es decir, a partir de las mediciones de  $I$ .
  - Múltiples valores escalares pueden cambiar las emisiones de radiación (temperatura, concentraciones de especies...).
  - Hoy en día la termografía infrarroja continúa teniendo una menor resolución espacial y escalar que los valores determinados mediante diagnósticos láser.
  - Solo unas pocas especies gaseosas pueden visualizarse mediante termografía infrarroja (por ejemplo,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) en comparación con otras técnicas basadas en las emisiones.
  - La concordancia entre el  $I$  calculado y medido no demuestra que las simulaciones sean correctas, pero permite confiar en que se ha encontrado una solución válida de las posibles.

En conclusión, la termografía infrarroja es una herramienta complementaria y útil para estudiar los flujos con medios participantes. Aunque presenta limitaciones y desafíos, su capacidad para proporcionar mediciones cuantitativas y cualitativas en entornos difíciles la convierte en una opción atractiva en diversas aplicaciones. Con el desarrollo continuo de la tecnología, se espera que la termografía infrarroja siga siendo una herramienta importante en la caracterización de los flujos en el futuro.

### **7.1.6 DETECCIÓN DE LA MORFOLOGÍA DE ELÉCTRODOS FLEXIBLES CONFORMADOS A PARTIR DE FABRICACIÓN ADITIVA**

Para mejorar el control de calidad de los electrodos flexibles fabricados en masa, se llevaron a cabo impresiones con chorro de tinta en el sustrato de PET flexible con la incorporación intencional de defectos. Los resultados obtenidos demuestran que el método de detección de defectos morfológicos es capaz de detectar los defectos en los electrodos flexibles a nivel de micras. La predicción cuantitativa muestra una buena linealidad ( $R^2 = 0,9887$ ), lo cual es una ventaja significativa en comparación con los métodos de detección microscópica, ya que permite una detección rápida y de amplio alcance.

Se observó que la termografía infrarroja incluso puede detectar los defectos en los electrodos flexibles durante el proceso de recocido, lo que garantiza una evaluación de calidad más completa. Sin embargo, en la detección de defectos de gran superficie, la temperatura de los puntos limitados que se marcan manualmente puede no ser lo suficientemente precisa. Por lo tanto, es necesario utilizar tecnologías avanzadas de procesamiento de imágenes para identificar con precisión las diferencias de temperatura de los píxeles, basándose en parámetros como la diferencia de color.

En el futuro, se podría explorar la combinación de la termografía infrarroja con métodos de procesamiento digital para identificar automáticamente los tipos y tamaños de defectos en los electrodos flexibles. Esto permitiría una detección automatizada y masiva de los electrodos, mejorando la eficiencia y la precisión del control de calidad en la producción en masa.

### 7.1.7 INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA SOBRE LA DETECCIÓN DE GRIETAS POR FATIGA EN PLACA METÁLICA MEDIANTE VIBRO-TERMOGRAFÍA

En este estudio, se llevó a cabo una investigación experimental y numérica para detectar grietas causadas por fatiga en una placa metálica utilizando la técnica de vibro-termografía. Se utilizó un transductor PZT de baja potencia para excitar la muestra de aluminio con la grieta, y se realizó un análisis cuantitativo de la grieta mediante el análisis de secuencias de imágenes térmicas. Además, se realizaron simulaciones mediante el método de elementos finitos para investigar la generación de calor en la superficie de la grieta bajo estimulación ultrasónica. Se estableció un mecanismo de contacto para analizar la fricción y los factores que afectan la generación de calor.

Las principales conclusiones obtenidas en este estudio son las siguientes:

- La vibro-termografía demostró ser eficaz en la detección de grietas por fatiga mediante la excitación de un transductor piezoeléctrico de baja potencia. Las secuencias de imágenes térmicas se procesaron utilizando la transformada de Fourier, y la longitud de la grieta se evaluó a partir de las imágenes de amplitud y fase a diferentes frecuencias. El error en la medición de la longitud de la grieta a partir de las imágenes de fase fue inferior al 4,3%.
- Se obtuvieron el desplazamiento relativo y la tensión normal de contacto en la superficie de la grieta, lo que permitió analizar la fricción y su influencia en la generación de calor y el aumento de temperatura durante la excitación ultrasónica.
- Se observó que la generación de calor en la superficie de la grieta aumenta con un mayor coeficiente de fricción y una menor anchura de la grieta.
- La vibro-termografía se presenta como una técnica de Ensayo No Destructivo (END) prometedora debido a su capacidad para obtener imágenes selectivas de defectos, lo que la hace adecuada para la detección de defectos superficiales y subsuperficiales en estructuras.

En resumen, este estudio demuestra que la vibro-termografía es una técnica efectiva para detectar grietas por fatiga, proporcionando una evaluación cuantitativa de la grieta y ofreciendo información valiosa sobre la fricción y la generación de calor en la superficie de la grieta.

---

## 8 REFERENCIAS

---

- [1] AETIR, «Guía de la termografía Infrarroja. Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética.,» 1012. [En línea]. [Último acceso: 3 Agosto 2022].
- [2] Wikipedia La enciclopedia Libre, «Macedonio Melloni,» 23 Abril 2022. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Macedonio\\_Melloni](https://es.wikipedia.org/wiki/Macedonio_Melloni). [Último acceso: 2 Septiembre 2022].
- [3] T. D.Crouch, «Samuel Pierpont Langley,» Britannica, 22 Agosto 2022. [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/biography/Samuel-Pierpont-Langley>. [Último acceso: 2 Septiembre 2022].
- [4] Direct INDUSTRY, «Detector de fotones Cricket,» VIRTUALESPO GROUP, 2022. [En línea]. Available: <https://www.directindustry.es/prod/photonis/product-82199-2210661.html>. [Último acceso: 1 Septiembre 2022].
- [5] S. Fonrouge, «Ondas electromagnéticas,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/ondaselecmag/espectro-electromagnetico>. [Último acceso: 10 Octubre 2021].
- [6] Generation Genius, Inc., «Generation Genius,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.generationgenius.com/es/espectro-electromagnetico-material-de-lectura-6-a-8-grado/>. [Último acceso: 12 Septiembre 2022].
- [7] A. Yunus y J. Afshin, Transferencia de calor y masa, México D.F.: McGrawHill, 2011.
- [8] Función de la Industria, «Acero trabajando al rojo vivo,» 21 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://funciondelaindustria.wordpress.com/2017/03/21/acero-trabajado-al-rojo-vivo/>. [Último acceso: 3 Octubre 2022].

- [9] aulafacil, «aulafacil,» 2 Enero 2022. [En línea]. Available: <https://www.aulafacil.com/cursos/fisica-y-quimica/el-color/reflexion-y-absorcion-137416>. [Último acceso: 2 Enero 2022].
- [10] S. Bilbao Eguron y M. Gravía García, «Reconocimiento de objetos a partir de imágenes termográficas,» 2012.
- [11] F. J. Rodríguez Atienza, «Aplicaciones de la termografía infrarroja en las,» Sevilla, 2020.
- [12] E. Miquel Hernández, «Cámaras termográficas (IR Térmico),» 2020.
- [13] D. C. C. Saavedra y L. Londoño Castillo, «docplayer,» [En línea]. Available: <https://docplayer.es/18942668-Diagnostico-termografico-de-la-subestacion-de-energia-electrica-del-edificio-1-bloque-b-bb-piso-0-p0-de-la-universidad-tecnologica-de-pereira.html>. [Último acceso: 22 Julio 2022].
- [14] Testo, «Guía de bolsillo para la termografía infrarroja,» 2008.
- [15] K. A. Tabet Aoul, R. Hagi, R. Abdelghani, M. Syam y B. Akhozheya, «Building Envelope Thermal Defects in Existing and Under-Construction Housing in the UAE; Infrared Thermography Diagnosis and Qualitative Impacts Analysis,» *MDPI*, vol. XIII, n° 4, p. 8, 19 Febreo 2021.
- [16] FLIR Systems, «Guía sobre la termografía para aplicaciones en edificios y energía renovable,» 2018.
- [17] FLIR, «TELEDYNE FLIR,» 2011. [En línea]. Available: [https://www.flir.es/?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=emea.es.solutions.crsseg.t.iw.om.brand.search&gclid=EAIaIQobChMI1Km1y-Xw-QIVBhkGAB2BkQjHEAAYASAAEgIvEPD\\_BwE](https://www.flir.es/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=emea.es.solutions.crsseg.t.iw.om.brand.search&gclid=EAIaIQobChMI1Km1y-Xw-QIVBhkGAB2BkQjHEAAYASAAEgIvEPD_BwE). [Último acceso: 15 Julio 2022].
- [18] Nick y N. Gromicko, «Blower door testing,» InterNACHI, 2023. [En línea]. Available: <https://www.nachi.org/blower-door-test.htm>. [Último acceso: 19 Enero 2023].

- [19] InfraTec GmbH, «InfraTec,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.infratec.eu/thermography/>. [Último acceso: 21 Febrero 2023].
- [20] T. A. C. Aguilar, «Aplicaciones de la termografía en electrónica, aeronáutica y defensa,» de *Aplicaciones de la termografía en electrónica, aeronáutica y defensa*, Jalisco, 2015.
- [21] «Grupo Control Seguridad,» 15 Febrero 2023. [En línea]. Available: <https://www.grupocontrol.com/tipos-de-cameras-termograficas/>. [Último acceso: 15 Marzo 2023].
- [22] ALAVA Ingenieros / El color del calor, «Cámaras termográficas para aplicaciones Industriales,» 2019. [En línea]. Available: [www.termografia.es](http://www.termografia.es). [Último acceso: 2023 Enero 3].
- [23] S. Caieiro, «Diario de Pontevedra,» 20 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://www.diariodepontevedra.es/articulo/o-morrazo/patrullero-base-marin-tabarca-recal-sabado-corcubion/20180706003003989615.html>. [Último acceso: 1 Mayo 2023].
- [24] Gobierno de España, «Armada Española,» 2023. [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquessuperficie/prefLang-es/08patrulleros--04patrulleros-clase-anaga--04patrullero-tabarca-p-28>. [Último acceso: 1 Mayo 2023].
- [25] J. M. Arias Bermejo, «Termografía: Fundamentos y Aplicaciones,» León, 2023.
- [26] IMPIC Termografía, «IMPIC,» 13 2023. [En línea]. Available: <https://impic.es/>. [Último acceso: 13 2023].
- [27] D. L. Blunck, «Applications of infrared thermography for studying flows in participating media,» *Elsevier Inc.*, vol. 130, pp. 1-27, 2022.
- [28] L. Xhang, Q. He y J. Hu, «Infrared thermography enabled morphology detection approach for additive manufactured flexible electrodes,» *materials letters*, vol. X, nº 16, pp. 1-5, 2022.

- [29] Wei, Qin, Han, Meng, Zhu, Jianguo, Zhuo, Lijun, Huang, Junke, Huang, Junke, Li, Wei y Xie, Weihua, «Experimental and numerical investigation on detection fatigue crack in metallic plate by vibro-thermography,» *Infrared Physics and Technology*, vol. 126, pp. 1-9, 2022.
- [30] FLIR Systems, «Guía de termografía para mantenimiento predictivo,» 2017.
- [31] D. Román, «Introducción a las nociones básicas de acústica,» [En línea]. Available: <https://www.domingo-roman.net/acusticabasica.html>. [Último acceso: 20 Octubre 2021].
- [32] L. wiki, «Ondas periódicas y anarmónicas,» [En línea]. Available: [https://luz.izt.uam.mx/wikis/mediawiki/index.php/Ondas\\_periodicas:\\_armonicas\\_y\\_anarmonic\\_as](https://luz.izt.uam.mx/wikis/mediawiki/index.php/Ondas_periodicas:_armonicas_y_anarmonic_as). [Último acceso: 20 Octubre 2021].
- [33] J. L.Fernández, «Fiscalab,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.fiscalab.com/apartado/frente-de-onda>. [Último acceso: 20 Septiembre 2021].
- [34] J. d. María, «Ondas longitudinales o transversales,» [En línea]. Available: [http://lasondasjoseymaria.epizy.com/ondas\\_longitudinales\\_o\\_transversales.html?i=1](http://lasondasjoseymaria.epizy.com/ondas_longitudinales_o_transversales.html?i=1). [Último acceso: 2021 Octubre 20].
- [35] Serway-Jewett, Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna, Séptima ed., vol. II, S. R. González, Ed., México D.F.: CENGAGE Learning, 2009.
- [36] Facultad de física UV, «Ondas Planas,» [En línea]. Available: [https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3D9bqWRp7XgvM&psig=AOvVaw2f-eFk\\_TnoOSBWV6w9LUqI&ust=1636118402782000&source=images&cd=vfe&ved=2ahUKEwiJ6veS5v7zAhWV7-AKHdLIBs0QjRx6BAgAEAk](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3D9bqWRp7XgvM&psig=AOvVaw2f-eFk_TnoOSBWV6w9LUqI&ust=1636118402782000&source=images&cd=vfe&ved=2ahUKEwiJ6veS5v7zAhWV7-AKHdLIBs0QjRx6BAgAEAk). [Último acceso: 1 Noviembre 2021].
- [37] Si, S. Flores Larsen y M. Hogn, «TERMOGRAFÍA INFRARROJA EN LA EDIFICACIÓN: APLICACIONES CUALITATIVAS,» 31 Octubre 2012. [En línea]. Available: [https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/14563/CONICET\\_Digital\\_Nro.17944.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/14563/CONICET_Digital_Nro.17944.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [Último acceso: 17 Noviembre 2021].

- [38] A. Moropoulou y N. Avdelidis, «Emissivity considerations in building thermography. Energy and Buildings 35,» 2003.
- [39] Recemsa, «¿Es lo mismo el hierro que el acero?,» 26 Diciembre 2013. [En línea]. Available: <https://www.elchatarro.com/es-lo-mismo-hierro-que-acero/>. [Último acceso: 2 Febrero 2022].
- [40] J. aceros, «Conoce el proceso de fabricación del acero inoxidable,» 3 Septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://jnaceros.com.pe/blog/proceso-fabricacion-del-acero-inoxidable/>. [Último acceso: 2 Febrero 2022].
- [41] P. Sampler, «TermaGraf,» Creative Commons, 18 1 2020. [En línea]. Available: <https://www.termagraf.com/>. [Último acceso: 15 5 2023].
- [42] «eBuilding,» 2023. [En línea]. Available: Generalmente, es común realizar el test de estanqueidad en la etapa de construcción, tanto en edificios nuevos como en rehabilitaciones. Puede llevarse a cabo en una parte específica del edificio, como una planta, o en todo el edificio en su conjunto. Por. [Último acceso: 20 Junio 2023].
- [43] F. Corporation, «Fluke Thermography,» 22 Enero 2023. [En línea]. Available: <https://www.fluke.com/es-es>. [Último acceso: 22 Enero 2023].
- [44] TermaGraf, «TermaGraf Control y servicios termográficos,» 2013 Enero 2013. [En línea]. Available: <https://www.termagraf.com/>. [Último acceso: 12 Octubre 2022].
- [45] OVACEN, «OVACEN,» 22 Noviembre 2021. [En línea]. Available: <https://ovacen.com/>. [Último acceso: 10 Septiembre 2022].
- [46] Juan Palacios - Ingeniería y Automatización Industrial, «Herramienta de Mantenimiento Predictivo,» Valencia, 2020.
- [47] C. Camacho Bedoya, D. F. Forero Silva y H. A. Sarmiento Díaz, «LA TERMOGRAFIA COMO HERRAMIENTA DE DIAGNOSTICO PREDICTIVO,» Lima, 2017.

- [48] APLITER Termografía, «Inspección de turbinas eólicas con cámaras termográficas de FLIR,» 2020.
- [49] FLIR Systems, «Termografías para diagnósticos eléctricos y mecánicos,» 2018.
- [50] FLUKE Thermography, «Introducción a los principios de la termografía,» 2009.
- [51] FLUKE Thermography, «Conceptos básicos de la termografía para la inspección de edificios,» 2014.
- [52] Gas Natutal Fenosa, «Informe de estudio termográfico en los edificios de la UAH,» Madrid, 2012.
- [53] The Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Company, «Infrared Thermography Survey,» Munich, 2022.
- [54] E. O. Peña Rodríguez y L. Y. Neita Duarte, «Principios básicos de la termografía y su utilización como técnica para el mantenimiento predictivo,» Floridablanca, 2011.
- [55] Testo, «Guía práctica-Termografía para instalaciones fotovoltaicas,» 2017.
- [56] E. Navarro Huerta, «Análisis térmico de paneles fotovoltaicos mediante,» Sevilla, 2022.
- [57] E. Sirilin, «Física de la luz,» 2015.
- [58] C. Fernández de Kirchner, «Radiaciones: Una mirada unidimensional,» 2016.
- [59] K. Rojas Monsalvo, «Radiación Electromagnética,» Bucamaranga, 2009.



# ANEXO I

## CÁMARA FLUKE Ti450 SF6

<b>Características principales</b>	
IFOV con lentes estándar (resolución espacial)	1,31 mrad, D:S 753:1
Resolución del detector	320 x 240 (76.800 píxeles) o 640 x 480 con SuperResolution
SuperResolution	Sí, en cámara y en software. Captura y cuadruplica los datos para crear una imagen de 640 x 480
Enfoque MultiSharp™	Sí, enfoca desde cerca y desde lejos en todo el campo de visión.
Autofocus LaserSharp®	Sí, con imágenes enfocadas de forma consistente. En todo momento.
Medidor láser de distancias	Sí. Calcula la distancia hasta el objeto y ofrece unas imágenes correctamente enfocadas en pantalla, así como las distancias
Enfoque manual avanzado	Sí
Pantalla táctil de alta resistencia	3,5 pulgadas (panorámica) 640 x 480 LCD
Diseño ergonómico y resistente, apto para su uso con una sola mano	Sí
Zoom digital	2x, 4x

<b>Medición de temperatura</b>	
Rango de medición de temperatura (no calibrado por debajo de -10 °C)	De -20 °C a +1200 °C (de -4 °F a +2192 °F)
Precisión	± 2 °C o 2 % (a 25 °C nominales, la mayor de ambas)
Sensibilidad térmica (NETD)	≤ 0,05 °C a 30 °C de objetivo (50 mK)
Modo de filtro (mejora de NETD)	≤ 0,03 °C a 30 °C de objetivo (30 mK)
Corrección de emisividad en pantalla	Sí (valor y tabla)
Compensación de la temperatura reflejada de fondo en pantalla	Sí
Corrección de transmitancia en pantalla	Sí

<b>Tecnología IR-Fusion®</b>	
Añade el contexto de los detalles visibles a la imagen por infrarrojos	
Modo AutoBlend™	IR mín., medio y máx. e imágenes completas de luz visible en la cámara; variables de forma continua en el software
Imagen en imagen (PIP)	Sí
Cámara digital integrada (luz visible)	5 Mp.

Conectividad inalámbrica	
Sí, a PC, iPhone® y iPad® (iOS 4s y posterior), Android™ 4.3 y posterior, y Wi-Fi a LAN (según disponibilidad geográfica)	
Compatible con la aplicación Fluke Connect®	Sí, conecte su cámara a su smartphone y las imágenes que tome se cargarán automáticamente en la app Fluke Connect® para ahorrar espacio y compartirlas
Software opcional Fluke Connect® Assets	Sí, asigne imágenes a los activos y cree órdenes de trabajo. Compare fácilmente diferentes tipos de mediciones (mecánicas, eléctricas o imágenes por infrarrojos) en un solo lugar.
Carga instantánea en Fluke Connect®	Sí, conecte su cámara a la red Wi-Fi de su edificio y las imágenes que tome se cargarán automáticamente en el sistema Fluke Connect® para visualizarlas en su smartphone o PC
Compatible con Fluke Connect®	Sí, se conecta de forma inalámbrica para seleccionar los instrumentos habilitados de Fluke Connect® y muestra las medidas en la pantalla de la cámara. Hasta cinco conexiones simultáneas.

Lentes		
Lente estándar	Resolución espacial (IFOV)	1,31 mrad, D:S 753:1
	Campo de visión	24 °H x 17 °V
	Distancia focal mínima	15 cm (aprox. 6 pulgadas)
	Tecnología IR-Fusion®	Imagen en imagen y pantalla completa
Lente inteligente de teleobjetivo 2x opcional	IFOV (resolución espacial)	0,65 mrad, D:S 1529:1
	Campo de visión	12 °H x 9 °V
	Distancia focal mínima	45 cm (aprox. 18 pulgadas)
	Tecnología IR-Fusion®	Imagen en imagen y pantalla completa
Lente inteligente de teleobjetivo 4x opcional	IFOV (resolución espacial)	0,33 mrad, D:S 2941:1
	Campo de visión	6,0 °H x 4,5 °V
	Distancia focal mínima	1,5 m (aprox. 5 pies)
	Tecnología IR-Fusion®	Imagen en imagen y pantalla completa
Lente inteligente de gran angular opcional	IFOV (resolución espacial)	2,62 mrad, D:S 377:1
	Campo de visión	46 °H x 34 °V
	Distancia focal mínima	15 cm (aprox. 6 pulgadas)
	Tecnología IR-Fusion®	Pantalla completa

<b>Batería</b>	
Baterías (reemplazables en el lugar de trabajo y recargables)	Dos juegos de baterías de ion de litio inteligentes con cinco indicadores LED de nivel de carga
Duración de la pila/batería	3-4 horas por batería (la duración real depende de la configuración y del uso)
Tiempo de carga de las baterías	2,5 horas para carga completa
Sistema de carga de la batería	Cargador para dos baterías o carga dentro de la cámara. Adaptador de carga opcional de 12 V para automóvil.
Funcionamiento con alimentación CA	Funcionamiento CA con fuente de alimentación incluida (100 V CA a 240 V CA, 50/60 Hz).
Ahorro de energía	Modos de apagado e hibernación seleccionables por el usuario

<b>Almacenamiento de datos y captura de imágenes</b>	
Amplias opciones de almacenamiento	Tarjeta de memoria micro SD de 4 GB extraíble, memoria flash integrada de 4 GB, capacidad de almacenamiento en unidad USB, carga en Fluke Cloud™ para almacenamiento permanente
Sistema de captura, revisión y almacenamiento de imágenes	Captura, revisión y almacenamiento de imágenes con una sola mano
Formatos de archivo de imagen	No radiométrico (.bmp) o (.jpeg), o totalmente radiométrico (.is2); no hace falta un software de análisis para los archivos no radiométricos (.bmp, .jpg y .avi)
Revisión de la memoria	Vista de imágenes en miniatura y en pantalla completa
Software	Software SmartView® para realizar análisis e informes completos y sistema Fluke Connect®
Formatos de archivos exportables con el software SmartView®	Bitmap (.bmp), GIF, JPEG, PNG, TIFF
Anotaciones de voz	Hasta 60 segundos de tiempo de grabación por imagen; reproducción en la propia cámara, auriculares Bluetooth opcionales disponibles pero no necesarios
IR-PhotoNotes™	Sí (5 imágenes)
Anotaciones de texto	Sí
Grabación de vídeo	Estándar y radiométrica
Formatos de archivo de vídeo	No radiométrico (MPEG - codificación .AVI) y totalmente radiométrico (.IS3)
Transmisión de vídeo (pantalla remota)	Sí, transmita en directo desde la pantalla de la cámara hasta su PC, smartphone o monitor de TV. Mediante USB o punto de acceso Wi-Fi o red Wi-Fi en software SmartView® a un PC; mediante punto de acceso Wi-Fi en app Fluke Connect® a un smartphone; o mediante HDMI a un monitor de TV
Uso de control remoto	Sí, mediante software SmartView® o app móvil Fluke Connect®
Captura automática (temperatura e intervalo)	Sí

<b>Paletas de color</b>	
Paletas estándar	8: hierro, azul-rojo, alto contraste, ámbar, ámbar invertido, metal caliente, escala de grises, escala de grises invertida
Paletas Ultra Contrast™	8: hierro, ultra, azul-rojo ultra, alto contraste ultra, ámbar ultra, ámbar inverso ultra, metal caliente ultra, escala de grises ultra, escala de grises inversa ultra
Especificaciones generales	
Velocidad de fotogramas	Versiones de 60 Hz o 9 Hz
Puntero láser	Sí
Luz LED (linterna)	Sí
Alarmas de color (alarmas de temperatura)	Temperatura alta, temperatura baja e isotermas (dentro del rango)
Medición de la temperatura en el punto central	Sí
Temperatura puntual	Marcadores de puntos fríos y calientes
Marcadores de puntos configurables por el usuario	3 marcadores de puntos configurables por el usuario
Recuadro central	Recuadro de medición expandible y contraíble con temperatura MIN-MAX-MED
Banda espectral infrarroja	7,5 µm a 14 µm (onda larga)
Temperatura de funcionamiento	De -10 °C a +50 °C (de 14 °F a 122 °F)
Temperatura de almacenamiento	De -20 °C a +50 °C (de -4 °F a 122 °F) sin baterías
Humedad relativa	10% a 95% sin condensación
Seguridad	IEC 61010-1: categoría II de sobretensión, grado de contaminación 2
Compatibilidad electromagnética	IEC 61326-1: entorno electromagnético básico. CISPR 11: Grupo 1, clase A
RCM de Australia	IEC 61326-1
FCC de EE. UU.	CFR 47, Parte 15, Subapartado B
Vibraciones	0,03 g2/Hz (3,8 gramos), 2,5 g IEC 68-2-6
Impactos	25 g, IEC 68-2-29
Caídas	Diseñado para resistir caídas de 2 metros (6,5 pies) con la lente estándar
Tamaño (L x An x Al)	27,7 x 12,2 x 16,7 cm (10,9 x 4,8 x 6,5 pulgadas)
Peso (batería incluida)	1,04 kg (2,3 lb)
Grado de protección	IEC 60529: IP54 (protección contra polvo, entrada limitada; protección contra salpicaduras de agua desde cualquier dirección)
Garantía	Dos años (estándar), disponibles garantías ampliadas.
Ciclo de calibración recomendado	Dos años (suponiendo un funcionamiento y envejecimiento normales)
Idiomas admitidos	Español, portugués, checo, holandés, inglés, finlandés, francés, alemán, húngaro, italiano, japonés, coreano, polaco, ruso, chino simplificado, sueco, chino tradicional y turco

<b>Nivel y rango</b>	
Escala automática progresiva y manual	
Cambio automático rápido entre modo manual y automático	Sí
Reajuste rápido y automático en modo manual	Sí
Rango mínimo (en modo manual)	2,0 °C (3,6 °F)
Rango mínimo (en modo automático)	3,0 °C (5,4 °F)